

ISSN 1684-8853 (print); ISSN 2541-8610 (online)

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

6(115)/2021

6(115)/2021

PEER REVIEWED JOURNAL

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

Founder

A. Vostrikov

PublisherSaint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

Executive secretary

O. Muravtsova

Editorial Board

S. Andreev

Dr. Sc., Tampere, Finland

V. Anisimov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Professor, Beer-Sheva, Israel

M. Buzdalov,

PhD, Researcher, Saint Petersburg, Russia

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

A. Dudin

Dr. Sc., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD, Professor, Riverside, USA

M. Favorskaya

Dr. Sc., Professor, Krasnoyarsk, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Hramov

Dr. Sc., Professor, Innopolis, Russia

L. Jain

PhD, Professor, Canberra, Australia

V. Khimenko

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

G. Matvienko

Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia

A. Myllari

PhD, Professor, Grenada, West Indies

Y. Podoplyokin

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

K. Samouylov

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

J. Seberry

PhD, Professor, Wollongong, Australia

M. Sergeev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Novosibirsk, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

T. Sutikno

PhD, Associate Professor, Yogyakarta, Indonesia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Professor, Vologda, Russia

Editor: A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, Yu. Umnitsyna**Layout and composition:** Yu. Umnitsyna**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67, B. Morskaia, 190000, Saint Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: ius.spb@gmail.com

Tel.: +7 - 812 494 70 02

THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS*Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. On the convergence of bumping routes to their limit shapes in the RSK algorithm. Numerical experiments*

2

INFORMATION PROCESSING AND CONTROL*Ryumin D. A., Kagirov I. A., Axyonov A. A., Karpov A. A. Analytical review of models and methods for automatic recognition of gestures and sign languages*

10

HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES*Korneeva I. P., Kramar K. A., Semenova E. A., Sergeev A. M., Yuldashev Z. M. Hardware and software complex for remote monitoring and control of a pregnant woman's health state*

21

SYSTEM AND PROCESS MODELING*Tomchin D. A., Sitchikhina M. S., Ananievsky M. S., Svetsitskaya T. A., Fradkov A. L. Prediction of COVID-19 pandemic dynamics in Russia based on simple mathematical models of epidemics*

31

INFORMATION SECURITY*Tatarnikova T. M., Bogdanov P. Yu. Intrusion detection in internet of things networks based on machine learning methods*

42

INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM*Batenkov A. A., Batenkov K. A., Fokin A. B. Analysis of the probability of connectivity of a telecommunications network based on the reduction of several non-connectivity events to a union of independent events*

53

CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS*Smirnova L. M., Ponomarenko G. N., Suslyayev V. G. Methodology and information-measuring system for personalized synthesis of lower limb prostheses*

64

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS*Contents of the journal «InformatSIONNO-upravliaiushchie sistemy (Information and Control Systems)» for 2021 [№ 1–6]*

75

80

6(115)/2021

ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИЕ
СИСТЕМЫ

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

Учредитель

А. А. Востриков

Издатель

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

Главный редактор

Е. А. Крук,

д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Ответственный секретарь

О. В. Муравцова

Редакционная коллегия:

С. Д. Андреев,

д-р техн. наук, Тампере, Финляндия

В. Г. Анисимов,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Б. П. Безручко,

д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,

д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

М. В. Буздалов,

канд. техн. наук, научный сотрудник, Санкт-Петербург, РФ

Л. С. Джайн,

д-р наук, проф., Канберра, Австралия

А. Н. Дудин,

д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

И. И. Думер,

д-р наук, проф., Риверсайд, США

А. И. Зейфман,

д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

К. Кристофолу,

д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США

Г. Г. Матвиенко,

д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ

А. А. Мюллери,

д-р наук, профессор, Гренада, Вест-Индия

Ю. Ф. Подоплёкин,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

К. Е. Самуилов,

д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Д. Себерри,

д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия

М. Б. Сергеев,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Т. Сутикнуоу,

д-р наук, доцент, Джокьякарта, Индонезия

М. Н. Фаворская,

д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ

Л. Фортуна,

д-р наук, проф., Катания, Италия

А. Л. Фрадков,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

В. И. Хищенко,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. Е. Храмов,

д-р физ.-мат. наук, Иннополис, РФ

А. А. Шалыто,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

А. П. Шепета,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Ю. И. Шокин,

акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ

З. М. Юлдашев,

д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Р. М. Юсупов,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова

Корректор: Т. В. Звертановская

Дизайн: М. Л. Черненко, Ю. В. Умницына

Компьютерная верстка: Ю. В. Умницына

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,

Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,

сайт: http://i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г. Перерегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82226 от 23 ноября 2021 г.

© А. А. Востриков, 2021

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. On the convergence of bumping routes to their limit shapes in the RSK algorithm. Numerical experiments

2

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Рюмин Д. А., Кагиров И. А., Аксёнов А. А., Карпов А. А. Аналитический обзор моделей и методов автоматического распознавания жестов и жестовых языков

10

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Корнеева И. П., Крамарь К. А., Семенова Е. А., Сергеев А. М., Юлдашев З. М. Аппаратно-программный комплекс для удаленного мониторинга и контроля состояния беременных женщин

21

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Томчин Д. А., Ситчихина М. С., Ананьевский М. С., Свенцицкая Т. А., Фрадков А. Л. Прогноз динамики пандемии COVID-19 по России на основе простых математических моделей эпидемий

31

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Татарникова Т. М., Богданов П. Ю. Обнаружение атак в сетях интернета вещей методами машинного обучения

42

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Батенков А. А., Батенков К. А., Фокин А. Б. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий

53

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Смирнова Л. М., Пономаренко Г. Н., Суслев В. Г. Методология и информационно-измерительная система для персонализированного синтеза протезов нижних конечностей

64

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

75

Содержание журнала «Информационно-управляющие системы» за 2021 г. [№ 1–6]

80

Журнал входит в БД SCOPUS и в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Сдано в набор 03.11.21. Подписано в печать 20.12.21. Формат 60×84^{1/8}.
Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 9,7. Уч.-изд. л. 13,5. Тираж 1000 экз (1-й завод 50 экз.). Заказ № 569.
Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.
Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

UDC 519.165, 517.938

doi:10.31799/1684-8853-2021-6-2-9

On the convergence of bumping routes to their limit shapes in the RSK algorithm. Numerical experiments

N. N. Vassiliev^{a,b}, PhD, Phys.-Math., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-0841-1168

V. S. Duzhin^b, PhD, Phys.-Math., Senior Lecturer, orcid.org/0000-0001-8399-284X, vsduzhin@etu.ru

A. D. Kuzmin^b, Master Student, orcid.org/0000-0001-9975-4686

^aSaint-Petersburg Department of V. A. Steklov Institute of Mathematics of the RAS, 27, Fontanka Emb., 191023, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bSaint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The Robinson – Schensted – Knuth (RSK) algorithm transforms a sequence of elements of a linearly ordered set into a pair of Young tableaux P, Q of the same shape. This transformation is based on the process of bumping and inserting elements in tableau P according to special rules. The trajectory formed by all the boxes of the tableau P shifted in the RSK algorithm is called the bumping route. D. Romik and P. Sniady in 2016 obtained an explicit formula for the limit shape of the bumping route, which is determined by its first element. However, the rate of convergence of the bumping routes to the limit shape has not been previously investigated either theoretically or by numerical experiments. **Purpose:** Carrying out computer experiments to study the dynamics of the bumping routes produced by the RSK algorithm on Young tableaux as their sizes increase. Calculation of statistical means and variances of deviations of bumping routes from their limit shapes in L_2 metric for various values fed to the input of the RSK algorithm. **Results:** A series of computer experiments have been carried out on Young tableaux consisting of up to 10 million boxes. We used 300 tableaux of each size. Different input values (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9) were added to each such tableau using the RSK algorithm, and the deviations of the bumping routes built from these values from the corresponding limit shapes were calculated. Graphs of the statistical mean values and variances of these deviations were produced. It was noticed that the deviations decrease in proportion to the fourth root of the tableau size n . An approximation of the dependence of the mean values of deviations on n was obtained using the least squares method.

Keywords – RSK algorithm, RSK correspondence, Young diagram, Young tableau, Plancherel measure, Vershik – Kerov curve, bumping route, limit shape, linearly ordered set, numerical experiment, asymptotic combinatorics.

For citation: Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. On the convergence of bumping routes to their limit shapes in the RSK algorithm. Numerical experiments. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2021-6-2-9

Introduction

The Robinson – Schensted – Knuth algorithm [1–5], also known as RSK transformation, defines a correspondence between the set of permutations of natural numbers and the set of pairs of standard Young tableaux of the same shape, the so-called insertion tableau P and recording tableau Q . The RSK algorithm finds applications in various problems of combinatorics.

The RSK transformation can also be applied to any infinite sequence of a linearly ordered set. In this case, the resulting recording Young tableau is semi-standard. The distinctive feature of such a tableau is that its elements do not decrease in rows and increase in columns. In this article, we use real numbers from the range $[0, 1]$ as the input of the RSK algorithm.

The problem of studying the trajectories of bumping routes in the RSK algorithm was first formulated in [6]. Later, the dynamics of motion of an element in the RSK algorithm and the dynamics of tableau P changes began to be studied from the combinatorial point of view in [7–13]. It led to the introduction of a

bumping tree and a bumping forest [14], as well as the study of their combinatorial structure. The bumping forest displays all possible transitions when the next sequence entry is added to the Young tableau during the iteration of the RSK algorithm.

An explicit expression for the limit shapes of the bumping routes for arbitrary values of elements inserted in the input sequence is given in [8]. The coordinates of the end of the bumping route give us the position of the added box to the corresponding tableau P .

This work is devoted to the study of the convergence of the bumping routes in the tableau P to their limit shapes as the number of boxes in P grows. In the frame of the work, a series of computer experiments were carried out with Young tableaux distributed according to Plancherel measure with sizes up to 10^7 boxes using the developed software package. As a result, the statistical means and variances of the distances between the bumping routes and their limit shapes were obtained for various input values and tableaux sizes.

The developed software package includes a set of operations for working with Young tableaux, an ef-

efficient implementation of the RSK algorithm, functions for calculating the limit shapes of bumping routes, various generators of random Young tableaux, and much more.

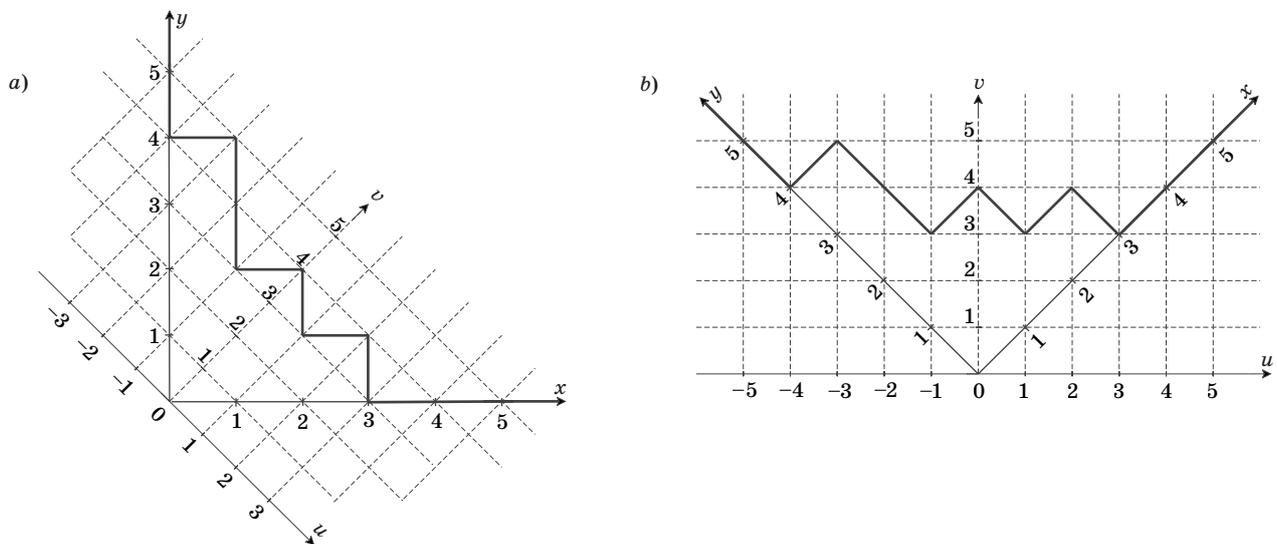
Definitions and basic notations

Young diagram is a finite set of boxes, arranged in bottom-aligned non-increasing columns. The set of Young diagrams consisting of n boxes is in one-to-one correspondence with the set of integer partitions $n = l_1 + l_2 + \dots + l_k$, where l_i are the heights of the columns of a Young diagram, $l_i \geq l_{i+1}$. We

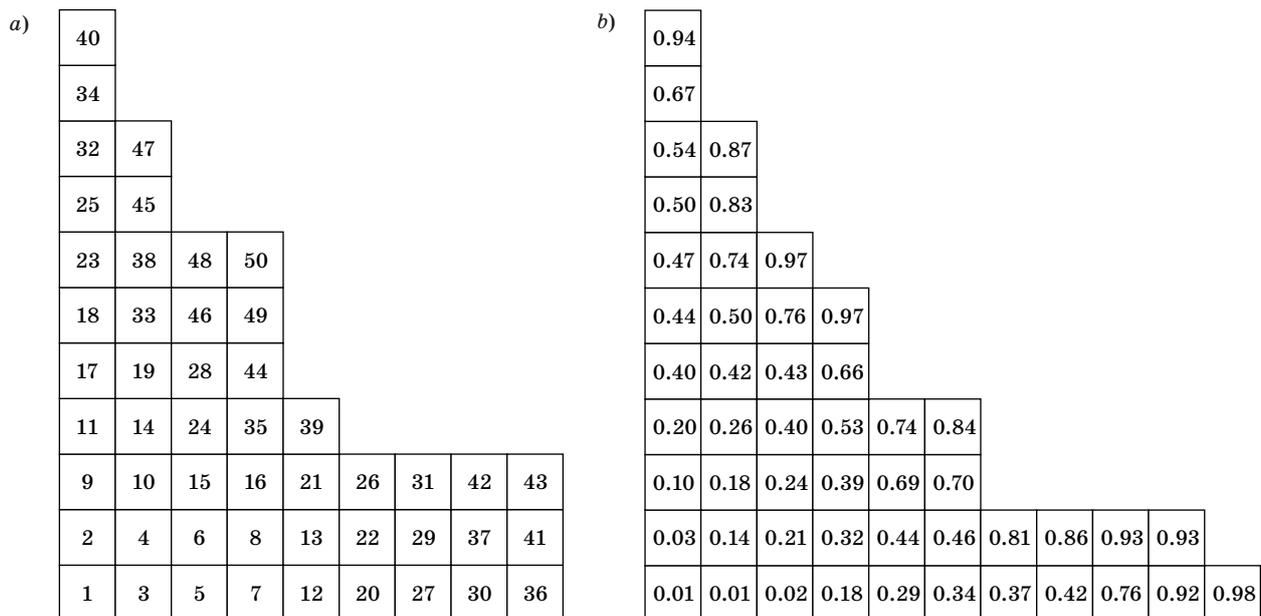
use so-called French notation to display diagrams, in which rows are horizontal and columns are bottom-aligned.

There used various coordinate systems for visualizing Young diagrams. In this work we use the rectangular coordinate system (x, y) and the Vershik — Kerov coordinate system (u, v) . The last one can be obtained from the rectangular coordinate system by rotating the axes by 45° . In Fig. 1, a and b , the bold line shows the shape of the Young diagram $\lambda(4, 2, 1)$, presented in both coordinate systems.

Young tableau is a Young diagram filled with values which increase in rows and columns. These values can be elements of an arbitrary linearly or-



■ Fig. 1. Young diagram in the rectangular (a) and the Vershik — Kerov (b) coordinate system



■ Fig. 2. Two examples of Young tableaux: standard (a) and semi-standard (b) tableau

dered set. In addition to finite Young tableaux, consisting of n boxes, it is possible to consider *infinite Young tableaux*. It is a mapping $\sigma: \mathbb{Z}_+^2 \Rightarrow \mathbb{N}$ such that for fixed $i, j \in \mathbb{N}$ the values $\sigma_{i,k}$ and $\sigma_{k,j}$ strictly increase as $k \rightarrow \mathbb{N}$. In this case, the mapping \mathbb{Z}_+^2 in the set of natural numbers \mathbb{N} is not necessarily a bijection, since all natural numbers may not be included in the tableau. An alternative name for infinite Young tableaux, used in this context by A. M. Vershik, is integer enumeration of semi-lattice \mathbb{Z}_+^2 .

Young tableau is called *standard* if it is filled with distinct natural numbers $1..n$ and *semi-standard* if it is filled with elements of an arbitrary linearly ordered set. In the semi-standard Young tableaux, the values do not decrease by row and strictly increase by column. The examples of a standard and a semi-standard Young tableau are depicted in the Fig. 2, *a* and *b*.

In this work, we study the properties of insertion of elements into extremely large semi-standard Young tableaux filled by real numbers from the interval $[0, 1]$ which are produced by the RSK algorithm.

Robinson — Schensted — Knuth algorithm

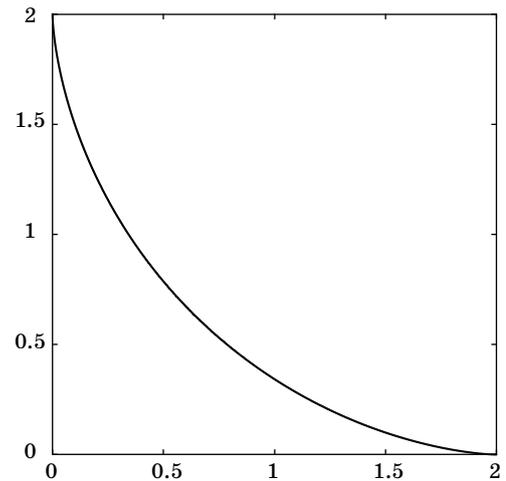
As it was said before, the RSK algorithm transforms an arbitrary input sequence of values into a pair of Young tableaux of the same shape, called insertion tableau P and recording tableau Q . In this case, tableau P is a semi-standard tableau filled with inserted values, and tableau Q is a standard tableau filled with natural numbers from 1 to n .

Let the input sequence s_1, s_2, \dots, s_n be fed to the RSK algorithm. We assume that the columns of tableaux P, Q are numbered from left to right, and the rows are numbered from bottom to top. Let us designate the columns of the tableau P as P_1, P_2, \dots, P_n , and the element in column col of row m as $P_{col,m}$. Initially the tableau P consists of one box containing the element s_1 . Then the algorithm for generating the tableau P is described as follows:

```

for each  $s_i$ :
  col = 1;  $\tau = s_i$ ;
  do
    if ( $\tau > \max(P_{col})$ )
      add  $\tau$  above  $P_{col}$ ;
    else
       $P_{col,m} = \min(P_{col,j} > \tau), j \in [1; \text{height}(P_{col})]$ ;
       $P_{col,m} \leftarrow \tau$ ;
       $k = k + 1$ ;
  while ( $\tau \leq \max(P_{col})$ );
end for;
```

Generation of the tableau Q does not require any additional calculations because after each expansion of the tableau P , the value i is placed on the top



■ Fig. 3. The Vershik — Kerov limit shape

of the column Q_k expanding the shape to match one of tableau P .

Note that we start searching for the element $\min(P_{col,j} > \tau)$ from the m -th coordinate of the previous bumping in the $col-1$ column. This is justified by the fact that the value in the box (col, m) is always greater than τ .

As stated above, the algorithm is capable of processing not only integer or real numbers, but also elements of any linearly ordered set. In this case, the tableau P is filled with elements of this set and therefore in general case is semi-standard.

If the input of the RSK algorithm receives a sequence of random real numbers uniformly distributed on the interval $[0, 1]$, then the resulting tableaux will be typical according to the Plancherel measure. Moreover, with an increase in the size of the tableaux, their profile tends towards the Vershik — Kerov curve [15]:

$$\Omega(u) = \frac{2}{\pi} \left(u \cdot \arcsin \frac{u}{2} + \sqrt{4 - u^2} \right), |u| \leq 2. \quad (1)$$

To transform (1) from the coordinate system (u, v) to the coordinate system (x, y) , we rotate it by 45° :

$$x = \frac{v - u}{2}, \quad y = \frac{v + u}{2}.$$

The Vershik — Kerov limit shape in a rectangular coordinate system (x, y) is shown in the Fig. 3.

Below we will describe the process of inserting some fixed value into an arbitrary insertion tableau P .

Bumping routes

Let us consider a tableau P of the shape $\lambda(n)$ with boxes filled by the values x_1, \dots, x_n . If we insert an

$$y_\alpha(t) = \frac{v_\alpha(t) + u_\alpha(t)}{2}. \quad (7)$$

Since the end of the bumping route lies on the Vershik — Kerov curve, the value of the x coordinate of the end of the bumping route for some α corresponds to the case $t = 1$ in formula (7):

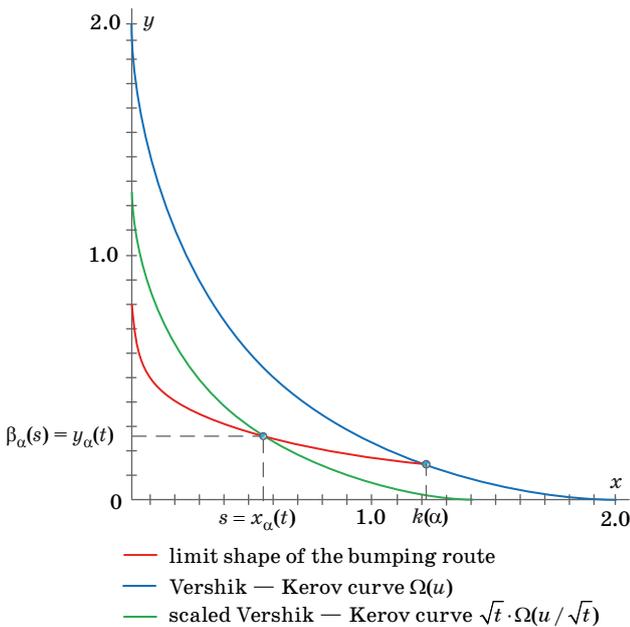
$$k(\alpha) = x_\alpha(1) = \frac{\Omega(F^{-1}(\alpha)) - F^{-1}(\alpha)}{2}. \quad (8)$$

Formulas (6), (7) allow to calculate the x, y coordinates for arbitrary intermediate values of t on the bumping route. The function describing the limit shape of the entire route for an arbitrary $\alpha \in [0, 1]$ has the form:

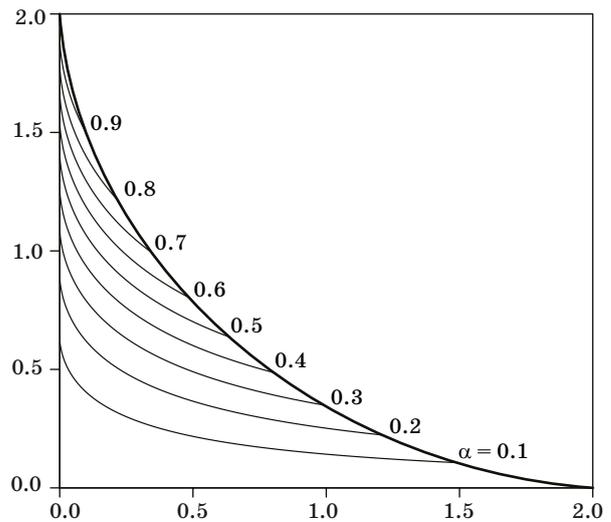
$$\beta_\alpha(s) = y_\alpha(x_\alpha^{-1}(s)), \quad 0 \leq s \leq k(\alpha), \quad (9)$$

where $k(\alpha)$ is the coordinate of the projection of the end of the route on the x -axis.

The use of formulas (1)–(9) is shown in the Fig. 6. The red line marks the theoretical limit of the bumping route starting from α . The parameter t is some intermediate value on this path. Due to the properties of Young tableaux, it satisfies the condition $\alpha \leq t \leq 1$, since the bumping route begins at the element α and ends at the limit shape (1) of the tableau. To determine the coordinates of a box filled by an arbitrary value of t on the bumping route, the limit shape is scaled down by a factor of \sqrt{t} , and then the coordinate of the intersection of the bumping route with the resulting curve is calculated, see formulas (4), (5). All the formulas described above are



■ Fig. 6. Calculation of the coordinates of the limit shape of the bumping route



■ Fig. 7. Limit shapes of the bumping routes

valid for the coordinate system (u, v) and it is possible to transform the obtained coordinates into the rectangular coordinate system (x, y) using formulas (6), (7). The limit shapes of the bumping routes for various inserted values of α are shown in the Fig. 7.

Note that in the case of $\alpha = 1$, the value is placed on the top of the first column and its bumping route includes only the box with this value; in the case of $\alpha = 0$, the bumping route goes along the entire first row.

There are many possible ways to implement the RSK algorithm. In the framework of this work, the standard implementation and the implementation using the bumping forest were made. In the first case, for each bumped value, we search for the closest greater value in the next column. In the second case, we do not need to perform such a search because the algorithm maintains the correctness of the bumping forest structure in tableau P .

Numerical experiments

The goal of this work is to investigate the convergence of the bumping routes in the L_2 norm using numerical experiments. In the course of these experiments, typical Plancherel-distributed Young tableaux were constructed with sizes up to $n = 10^7$ boxes, for which the means and variances of the deviations of the bumping routes from the limit shape were calculated. Since our computer experiments were carried out on extra-large tableaux, they required significant computational resources. Therefore, for each n , we limited ourselves to generating 300 tableaux only.

Note that the different bumping routes corresponding to the same value of α could be end-

ed in different boxes of the profile of the tableau. Therefore, when comparing these routes, we scale them along the x -axis so that their projections on the x -axis coincide with the projection on the x -axis of the corresponding limit shape.

A certain fixed value of α was inserted into each of the generated tableaux P , the corresponding bumping route was constructed, and its deviation from the limit shape in L_2 norm was calculated. Then the statistical means and variances were calculated for 300 obtained deviations. As a result, for each pair of values of n, α , we obtained the mean value and the variance of deviation of bumping routes from the limit shape.

Experimental results

In our computational experiments, we have constructed Young tableaux with sizes $n = 10^5..10^7$ boxes with a step of 10^5 for which the means and variances of the deviations of the bumping routes from the limit shape were calculated. The following values of the element α were fed to the input of the RSK algorithm: $\alpha = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$.

It was noticed that the distances between the bumping routes and the corresponding limit curves decrease proportionally $\frac{1}{n^4}$. Therefore, these distances were approximated by the following curve using the least squares method:

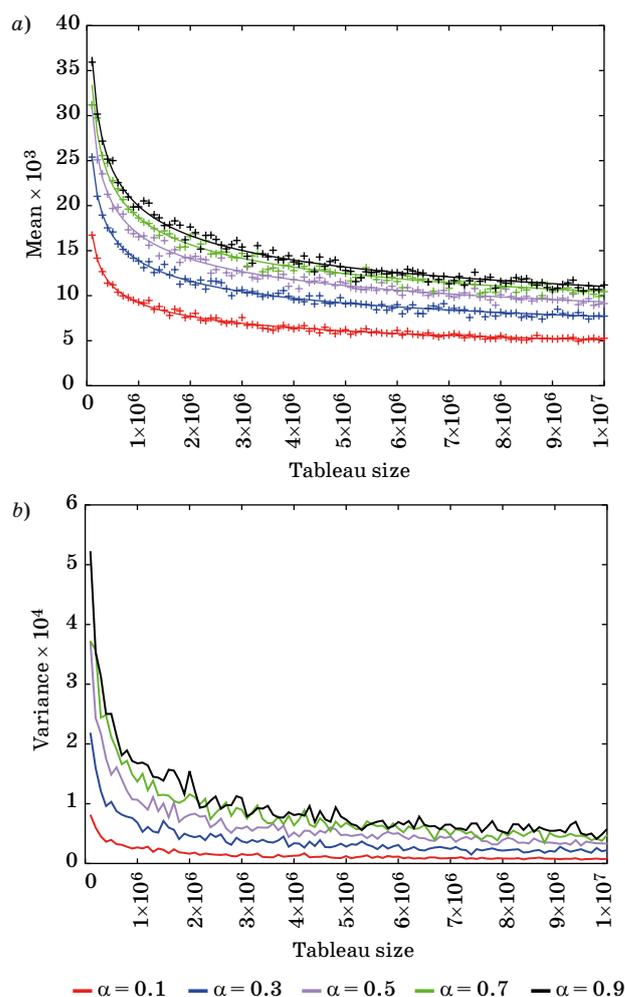
$$f(n) = a \cdot n^{-\frac{1}{4}} + b \cdot n^{-\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

We calculated the coefficient b to estimate the remainder term, which is small in comparison with $\frac{1}{n^4}$. Coefficients $a(\alpha)$ and $b(\alpha)$, obtained for tableaux of sizes $n \in [10^5..10^7]$, are shown in the Table.

The graphs of the deviations of the bumping routes from the limit shape for $\alpha = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$,

■ Values of the coefficients a and b depending on inserted values of α

| α | a | b |
|----------|----------|----------|
| 0.1 | 0.280062 | 0.358644 |
| 0.3 | 0.422171 | 0.544981 |
| 0.5 | 0.511865 | 0.661715 |
| 0.7 | 0.585168 | 0.167618 |
| 0.9 | 0.606942 | 0.760016 |



■ Fig. 8. Mean values (a) and variances (b) of deviations of bumping routes from their limit shapes and corresponding approximating curves

0.9 are shown in the Fig. 8, a. For each tableau size $< 10^6$, 1000 tableaux and the corresponding routes were built. For larger sizes, 300 tableaux were built for each size.

With the increase in the size of the tableaux, deviations from the limit shape gradually decrease. In addition to the experimentally obtained values, the Fig. 8, a shows approximating curves (10) constructed using the values from the Table. As we see from the figure, the curves approximate the experimental data quite well.

Figure 8, b shows the variances of the obtained deviations for the same five values of α . We did not attempt to approximate the variance graphs, but we assume that it can also be done using function similar to (10). As one can see from the figure, the variance, although slowly, but decreases with the increase in the size of the tableaux. The smaller the α values, the smaller the values and oscillations of variances.

Conclusions

We performed computer experiments to study the rate of convergence of the bumping routes of the RSK algorithm to the limiting theoretical curves obtained in [8] for different inserted values α .

300 Plancherel-distributed Young tableaux were generated for each size $n = 10^5 \dots 10^7$ with a step of 10^5 . Next, 5 values of $\alpha = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ have been added to these tableaux using the RSK algorithm. Therefore, we obtained the bumping routes for each inserted α . For each tableau, the deviation of the bumping route from the corresponding limit shape in the L_2 norm was calculated. The means and variances of the calculated deviations were obtained. It was noticed that these mean values decrease with increasing size in proportion to $n^{-\frac{1}{4}}$. The graphs of the mean values were approximat-

ed by the least squares method using a function

$$f(n) = a \cdot n^{-\frac{1}{4}} + b \cdot n^{-\frac{1}{2}}.$$

Unfortunately, the slow rate of convergence of the bumping routes to the limit shape, as well as the limited computational resources, did not allow us to increase the number and the sizes of the Plancherel tableaux involved into our experiments.

Further plans include the study of the distance between the coordinates of some fixed value lying on the bumping route and on the corresponding limit shape. We also plan to optimize the developed code in order to process larger Young tableaux.

Financial support

This work was supported by an RNF grant 21-11-00152.

References

1. Robinson G. de B. On the representations of the symmetric group. *American Journal of Math.*, 1938, vol. 60, pp. 745–760.
2. Schensted C. Longest increasing and decreasing subsequences. *Canadian Journal of Math.*, 1961, vol. 13, pp. 179–191.
3. Knuth D. E. Permutations, matrices, and generalized Young tableaux. *Pacific J. Math.*, 1970, vol. 34, iss. 3, pp. 709–727.
4. Stanley R. P. *Enumerative combinatorics*. Ser. Cambridge Studies in Advanced Mathematics, vol. 62. Cambridge University Press, Cambridge, 1999. Vol. 2. 581 p.
5. Fulton W. *Young Diagrams, with applications to representation theory and geometry*. Cambridge University Press, 1996. 272 p.
6. Moore C. Flows in Young diagrams. 2006. Available: <http://tuvalu.santafe.edu/~moore/gallery.html> (accessed 18 August 2021).
7. Vershik A. M. Combinatorial encoding of Bernoulli schemes and the asymptotic behavior of Young tableaux. *Funct Anal Its Appl*, 2020, vol. 54, pp. 77–92. <https://doi.org/10.1134/S001626632002001X>
8. Romik D., Sniady P. Limit shapes of bumping routes in the Robinson — Schensted correspondence. *Random Struct. Algorithms*, 2016, vol. 48, iss. 1, pp. 171–182. <https://doi.org/10.1002/rsa.20570>
9. Marciniak M., Maślanka Ł. & Sniady P. Poisson limit of bumping routes in the Robinson — Schensted correspondence. *Probab. Theory Relat. Fields*, 2021, vol. 181, pp. 1053–1103. <https://doi.org/10.1007/s00440-021-01084-y>
10. Marciniak M. Hydrodynamic limit of the Robinson — Schensted — Knuth algorithm. *Random Struct. Algorithms*, 2021. <https://doi.org/10.1002/rsa.21016>
11. Sniady P. Robinson — Schensted — Knuth algorithm, jeu de taquin and Kerov — Vershik measures on infinite tableaux. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 2013, vol. 28, iss. 2. doi:10.1137/130930169
12. Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. Investigation of properties of equivalence classes of permutations by inverse Robinson — Schensted — Knuth transformation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 1, pp. 11–22 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-1-11-22
13. Duzhin V. S. Investigation of insertion tableau evolution in the Robinson — Schensted — Knuth correspondence. *Discr. Contin. Models Appl. Comput. Sci.*, 2019, vol. 27, iss. 4, pp. 316–324.
14. Duzhin V., Kuzmin A., Vassiliev N. RSK bumping trees and a fast RSK algorithm. *International Conference Polynomial Computer Algebra*, Saint-Petersburg, April 15–20, 2019, 2019, pp. 64–66.
15. Vershik A. M., and Kerov S. V. Asymptotic of the largest and the typical dimensions of irreducible representations of a symmetric group. *Functional Anal. Appl.*, 1985, vol. 19, iss. 1, pp. 21–31.

УДК 519.165, 517.938

doi:10.31799/1684-8853-2021-6-2-9

О сходимости путей выталкиваний в алгоритме RSK к их предельной форме. Численные экспериментыН. Н. Васильев^{а,б}, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, orcid.org/0000-0002-0841-1168В. С. Дужин^б, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель, orcid.org/0000-0001-8399-284X, vsduzhin@etu.ruА. Д. Кузьмин^б, магистрант, orcid.org/0000-0001-9975-4686^аСанкт-Петербургское отделение Математического института им. В. А. Стеклова РАН, наб. р. Фонтанки, 27, Санкт-Петербург, 191023, РФ^бСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Профессора Попова ул., 5, Санкт-Петербург, 197376, РФ

Введение: алгоритм Робинсона — Шенстеда — Кнута (RSK) преобразует последовательность элементов линейно упорядоченного множества в пару таблиц Юнга P, Q одинаковой формы. Это преобразование основано на выталкивании и вставке элементов в таблицу P по специальным правилам. Траектория, которую образуют последовательно выталкиваемые клетки таблицы P в алгоритме RSK, называется путем выталкиваний. Явная формула предельной формы пути выталкиваний, которая определяется его начальным элементом, была получена Д. Ромиком и П. Сняды в 2016 г. Однако скорость сходимости путей выталкиваний к предельной форме ранее не исследовалась ни теоретически, ни с помощью численных экспериментов. **Цель:** проведение компьютерных экспериментов в целях изучения динамики путей выталкиваний, порождаемых алгоритмом RSK в таблицах Юнга, с ростом их размера; вычисление статистических средних и дисперсий отклонений путем выталкиваний от их предельных форм в метрике L_2 для различных значений, подаваемых на вход алгоритма RSK. **Результаты:** проведена серия компьютерных экспериментов над таблицами Юнга размера до 10 млн клеток. Использовалось по 300 таблиц каждого размера. В каждую такую таблицу с помощью алгоритма RSK добавлялись различные входные значения (0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9) и были вычислены отклонения путей выталкиваний, построенных от этих значений, от соответствующих предельных форм. Построены графики средних значений и дисперсий этих отклонений. Замечено, что отклонения убывают пропорционально корню четвертой степени из размера таблицы n . Получена аппроксимация зависимости средних значений отклонений от n с помощью метода наименьших квадратов.

Ключевые слова — алгоритм RSK, соответствие RSK, диаграмма Юнга, таблица Юнга, мера Планшереля, кривая Вершика — Керова, путь выталкиваний, предельная форма, линейно упорядоченное множество, численный эксперимент, асимптотическая комбинаторика.

Для цитирования: Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. On the convergence of bumping routes to their limit shapes in the RSK algorithm. Numerical experiments. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 6, с. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2021-6-2-9

For citation: Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. On the convergence of bumping routes to their limit shapes in the RSK algorithm. Numerical experiments. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2021-6-2-9

Финансовая поддержка

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-11-00152.

Аналитический обзор моделей и методов автоматического распознавания жестов и жестовых языков

Д. А. Рюмин^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, orcid.org/0000-0002-7935-0569

И. А. Кагиров^а, научный сотрудник, orcid.org/0000-0003-1196-1117, kagirov@iias.spb.su

А. А. Аксёнов^а, младший научный сотрудник, orcid.org/0000-0002-7479-2851

А. А. Карпов^а, доктор техн. наук, доцент, главный научный сотрудник, orcid.org/0000-0003-3424-652X

^аСанкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

Введение: распознавание жестов и жестовых языков является одной из наиболее развивающихся областей компьютерного зрения и прикладной лингвистики. Результаты исследований автоматического распознавания жестов находят применение в самых разных областях — от сурдоперевода до жестовых интерфейсов. В связи с этим разрабатываются разнообразные системы и методы для анализа жестовых данных. **Цель:** выполнить подробный обзор методов и провести сравнительный анализ существующих подходов в области автоматического распознавания жестов и жестовых языков. **Результаты:** анализ известных публикаций показал, что основными проблемами в области распознавания жестов являются детектирование артикуляторов (в первую очередь рук), распознавание их конфигурации и сегментация жестов в потоке речи. Сформулирован вывод о перспективности применения двухпоточных сверточных и рекуррентных архитектур нейросетей для эффективного извлечения и обработки пространственных и темпоральных признаков жеста, а также для решения проблемы автоматического распознавания жестов и коартикуляций в потоке речи. При этом решение указанной проблемы напрямую зависит от качества и доступности наборов данных. **Практическая значимость:** представленный обзор рассматривается как вклад в изучение быстро развивающихся подходов к решению задачи распознавания жестовых данных независимо от материалов конкретных естественных жестовых языков. Результаты работы могут быть использованы при проектировании программных систем для автоматического распознавания жестов и жестовых языков.

Ключевые слова — жестовые языки, жестовый корпус, распознавание жестов, геометрия рук, машинное обучение, компьютерное зрение, нейросетевая модель, цифровая обработка, морфологическая обработка, информативные признаки.

Для цитирования: Рюмин Д. А., Кагиров И. А., Аксёнов А. А., Карпов А. А. Аналитический обзор моделей и методов автоматического распознавания жестов и жестовых языков. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 6, с. 10–20. doi:10.31799/1684-8853-2021-6-10-20

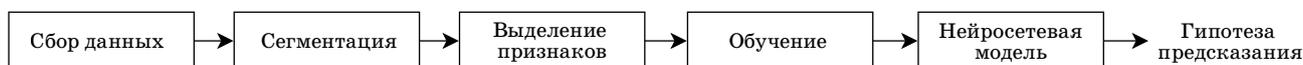
For citation: Ryumin D. A., Kagirov I. A., Axyonov A. A., Karpov A. A. Analytical review of models and methods for automatic recognition of gestures and sign languages. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 10–20 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-10-20

Введение

На сегодня в сфере автоматического распознавания жестов и компьютерного зрения применяется широкий круг методов; несколько упрощая ситуацию, но нисколько ее не искажая, можно констатировать, что чаще всего автоматическое распознавание жеста складывается из этапов, представленных на рис. 1.

На первом этапе создается жестовый корпус, необходимый для обучения нейросетевой модели. Зачастую одновременно происходит предоб-

работка (нормализация) входных данных (изображений или полноцветных (RGB) кадров видеопотока), при которой используется широкий круг методов цифровой обработки: яркостное преобразование; сглаживание и повышение резкости; масштабирование; пространственная фильтрация и т. д. Следующий этап представлен морфологической обработкой (дилатация, эрозия, обнаружение перепадов и др.) и сегментацией изображений на отдельные области интереса. После предобработки становится возможным извлечение информативных признаков, приме-



■ **Рис. 1.** Этапы извлечения информативных признаков жеста и создания модели на основе нейросетей

■ **Fig. 1.** Stages of informative features extraction and creation of a neural network-based model

няемых на последующем этапе для обучения нейросети и создания нейросетевой модели. В современных интеллектуальных системах признаки, как правило, извлекаются самой нейросетью и не выносятся в отдельный этап.

Следует обратить внимание на то, что в представленной схеме (см. рис. 1) отсутствует этап, на котором происходит собственно перевод на/с жестового языка. Такое решение обусловлено, прежде всего, тем, что системы, ориентированные на перевод, ограничиваются в основном лабораторными проектами или предназначены для перевода звучащего языка (зачастую — его текстового представления) в жестовую форму (Zarvoz, TEAM, ASL Synthesizer, «Сурдофон»). Кроме того, для анализа высказываний на жестовом языке предварительно требуется система, с высокой точностью идентифицирующая жесты, и именно распознаванию жестов посвящено подавляющее большинство публикаций по теме, вышедших в последнее время [1, 2].

Разберем основные методы и подходы, применяемые на этапах, отраженных на рис. 1.

Жестовые наборы данных и корпуса

Как правило, любое исследование в области машинного обучения начинается с использования какого-либо из существующих наборов данных или корпусов (отличается наличием аннотации и сегментации) или со сбора нового. В последнем случае исследователи собирают набор данных и аннотируют его, основываясь на поставленной цели и определенных задачах. Широкое распространение получили корпуса, содержащие отдельные слова, числительные и

буквы. В настоящее время в открытом доступе существует множество жестовых наборов данных и корпусов, собранных разными исследователями для разных целей (табл. 1).

Все представленные выше корпуса различаются количеством жестов, аппаратными средствами видеозахвата, фоновой обстановкой и, самое главное, задачами, для которых они создавались. Большинство корпусов в свободном доступе, существующих на сегодня, собраны и аннотированы для задач распознавания конфигураций рук диктора или отдельных жестов; корпусов, предназначенных для распознавания слитной жестовой речи, гораздо меньше. Как правило, для подобных исследований принято собирать собственный корпус. Также следует отметить, что единственный относительно крупный аннотированный корпус для русского жестового языка предназначен для решения образовательных и (или) строго лингвистических задач (<http://rsl.nstu.ru/>).

Сегментация изображения

Под сегментацией изображений понимается разбиение исходного изображения на непохожие по ряду признаков области, при этом предполагается, что каждая такая область содержит отдельный объект или его часть, а границы между областями соответствуют границам между объектами или их частями на исходном изображении. В случае с задачей автоматического распознавания жестовой информации основной целью сегментации изображения является выделение графических областей интереса, содержащих артикуляторы диктора (в первую очередь руки).

■ **Таблица 1.** Крупнейшие доступные жестовые корпуса (с 2014 г.)

■ **Table 1.** The largest open-source sign corpora (since 2014)

| Ссылка | Год | ЗР | ПО | Классы | Записи | Р | УЗ |
|--------|------|--------------------------------|-----|--------|----------------|---|-------------------------|
| [3] | 2014 | Слитная жестовая речь | 9 | 1200 | 45 760 | + | ЦК |
| [4] | 2016 | Изолированные жесты | 21 | 249 | 47 933 | + | Kinect |
| [5] | 2017 | Конфигурация и ориентация руки | н/д | н/д | 1,7 млн кадров | – | Искусственная генерация |
| [6] | | | 10 | 496 | 2,2 млн кадров | + | |
| [7] | 2018 | Изолированные жесты | 50 | 83 | 2081 | + | Intel RealSense |
| [8] | | | 9 | 1066 | 67 781 | – | |
| [9] | | | 10 | 100 | 10 000 | + | |
| [10] | 2020 | Конфигурация | 26 | 93 | 2,6 млн кадров | – | ЦК |
| [11] | | Слитная жестовая речь | н/д | 2000 | 21 083 | + | |
| [12] | | | | 226 | 38 336 | + | |

Примечание: ЗР — задача распознавания; ПО — количество предметных областей; Р — разметка; УЗ — устройство захвата (камера, сенсор); ЦК — цветная камера; н/д — нет данных.

Сегментация изображений может проводиться вручную, полуавтоматически и автоматически. Результаты ручной сегментации по-прежнему считаются лучшими по качеству [13], однако ручная сегментация не всегда возможна при работе с большими наборами данных, поскольку требует больших человеческих и временных затрат. Полуавтоматические методы сегментации частично решают эту проблему, однако по-прежнему требуют человеческого присутствия. Последнее особенно важно в контексте сегментации, поскольку экспертная разметка все же не свободна от ошибок; кроме того, разметка одного и того же набора данных может различаться у разных экспертов. В то же время единой разработанный алгоритм автоматической сегментации изображения всегда будет работать одинаково.

В литературе выделяются разнообразные методы автоматической сегментации изображений (корреляционные, пороговые и текстурные методы, глубокое обучение и т. п.); следует отметить, что одним из самых старых методов распознавания жестов является определение артикуляторов по цвету кожи [14].

Современные методы сегментации подразумевают использование машинного обучения. Большинство из них основано на семействе архитектур R-CNN. В принципе, нейросетевая модель R-CNN (и ее модификации Fast R-CNN и Faster R-CNN [15, 16]) является частным случаем техники автоматической сегментации изображения; к основным недостаткам R-CNN можно отнести энергозатратность (продолжительное время на процесс обучения) и неспособность функционировать в режиме реального времени.

R-CNN и развивающие ее архитектуры CNN (Convolutional Neural Network, ‘сверточная нейронная сеть’) не работают со всем изображением, подаваемым на вход. Для решения этой проблемы была разработана другая архитектура CNN, а именно You Only Look Once (YOLO) [17]. YOLO разбивает входное изображение на сетку (матрицу пикселей), в дальнейшем обрабатывая каждый сегмент отдельно. Классификация каждого сегмента производится с помощью единственной CNN. Недостаток YOLO заключается в невысокой эффективности сегментации и классификации мелких объектов на изображении. В работе [18] была предложена другая CNN обнаружения объектов (Single Shot Multi-box Detector), которая работает при разных ориентациях искомых объектов, устойчива к окклюзиям, а также работает в режиме реального времени.

В большинстве современных нейросетевых моделей для обнаружения областей рук используются архитектуры CNN или же их комбинации с другими разновидностями нейронных сетей, например долгая кратковременная память (Long

Short-Term Memory — LSTM) [19, 20], которая способна извлекать пространственно-временные признаки жеста из последовательностей ранее сегментированных областей интереса.

Извлечение информативных визуальных признаков

Этап извлечения информативных признаков является ключевым в любой интеллектуальной системе, предназначенной для автоматического распознавания жестов. Извлеченные признаки прямо влияют на конечный результат распознавания, поскольку именно на этом этапе создаются входные данные для последующей классификации и образуется гипотеза предсказания.

Современные методы извлечения признаков в контексте распознавания жестовых языков можно разбить на следующие группы.

1. Методы, основанные на внешнем виде (appearance-based) [21, 22], подразумевают извлечение визуальных признаков для построения модели артикулятора (внешнего вида). Иногда признаки вычисляются на основании степени интенсивности пикселей, без предварительной сегментации. Такие методы работают в реальном времени благодаря довольно простому процессу извлечения признаков из двумерных (2D) данных. В работе [22] извлечение признаков основано на примитивах Хаара. Преимущество этого подхода состоит в способности к анализу контрастности между темными и яркими объектами на изображении и низким уровнем зависимости от окклюзий и динамики освещения.

2. N-точечные модели [23] и детектирование по карте глубины (3D) [24] характерны для тех случаев, когда основным устройством захвата видеоинформации является сенсор с датчиком глубины, такой как Azure Kinect или Leap Motion Controller. N-точечные модели работают с признаками скелета руки, задающими ее геометрические характеристики (например, ориентацию пальцев и расстояние между ними).

3. Методы на основе 3D-моделей используют трехмерный видеопоток информации в виде карты глубины или трехмерного облака точек до элементов артикулятора, фактически позволяя оперировать объемной моделью руки. Для обучения таких нейросетевых моделей хорошо подходят архитектуры 3D CNN [25]. Существенный недостаток архитектур 3D CNN заключается в том, что для их обучения требуется наличие довольно большого корпуса данных.

Среди прочих методов извлечения признаков можно упомянуть анализ главных компонент, линейный дискриминантный анализ и метод опорных векторов [26].

Обучение нейросетевой модели

Следует констатировать, что на сегодня преобладающим направлением в области автоматического распознавания жестов (и, в отдельных случаях, собственно распознавания жестового языка [27]) являются методы машинного обучения. Применение таких методов, в частности моделей CNN и LSTM, для обозначенной задачи обусловлено их высоким потенциалом извлечения как пространственных, так и временных признаков из видеопотока.

Можно выделить основные задачи, для решения которых применяются методы машинного обучения: 1) оценка конфигурации артикулятора; 2) распознавание жестов в потоке слитной речи.

Оценка конфигурации и ориентации руки артикулятора

Оценка положения руки — это процесс моделирования руки в виде набора ее некоторых частей (например, ладони и пальцев) для определения их положения в пространстве. Существуют подходы к решению этой задачи (например, [28]), оперирующие фалангами пальцев, однако почти во всех современных работах рука представляется по суставам пальцев, что сводит задачу моделирования фактически к нахождению положения всех суставов.

Чаще всего методы оценки конфигурации кистей рук подразумевают вычисление вероятности положения отдельных областей рук, соответствующих фалангам, пальцам и ладоням, на основе анализа 2D-плоскости полноцветного изображения или моделирования скелета кисти в 3D-пространстве. Так, например, в работе [29] карта глубины использовалась для оценки положения каждого из 21 элемента кисти руки диктора, однако локализация областей, содержащих кисти рук, производилась на изображениях в формате RGB.

Основная трудность 2D-подходов состоит в том, что уменьшение размера входных данных с 3D до 2D значительно усложняет задачу. Обычно для обучения сети с использованием изображений в формате RGB требуется гораздо больше данных, чем для обучения аналогичной сети с использованием карт глубины [30–32].

К современным методам анализа 3D-информации относится применение генеративно-сопоставительных нейросетей (Generative Adversarial Network — GAN) [33], которые состоят из двух взаимосвязанных нейросетевых моделей (генератора и дискриминатора). Цель генератора — создавать новые изображения, а дискриминатора — оценивать их подлинность. В упомянутой работе использовался алгоритм CyclicGAN [34],

■ *Таблица 2.* Оценка конфигурации кисти при помощи нейросетевых моделей

■ *Table 2.* Hand pose estimation with the use of deep-learning models

| Ссылка | Основная архитектура | Тип данных | Набор данных | Средняя мера ошибки |
|--------|--------------------------|------------|------------------|---------------------|
| [35] | CNN | 3D | MSRA Hand [41] | 8 |
| [37] | Вариационный автоэнкодер | RGB+3D | ICVL [42] | 19,5 |
| [33] | GAN | 3D | | 8,5 |
| [38] | CNN | 3D | | 6,28 |
| [6] | CNN | RGB+3D | BigHand2.2M [10] | 17,1 |
| [33] | GAN | 3D | | 13,7 |
| [39] | CNN | 2D (RGB) | STB [43] | 8,34 |
| [40] | CNN | RGB+3D | | 5 |

причем генератор порождал конфигурации рук, основываясь на 3D-представлении кисти диктора. Другой распространенной техникой является моделирование псевдотрехмерной (2.5D) [35] руки на основе данных, полученных от карты глубины.

Для сравнения в табл. 2 представлены основные архитектуры нейросетевых моделей и их значения ошибки при формировании гипотезы предсказания относительно конфигурации кисти руки, сгруппированные по двум тестовым наборам данных из корпусов BigHand2.2M и ICVL [36].

Распознавание жестовой информации в потоке слитной речи

Перечисленные выше методы достаточно хорошо работают в том случае, если речь идет о распознавании изолированных и статических жестов. Ситуация усложняется, если жест оказывается динамическим и (или) включенным в цепочку жестов, иными словами, при распознавании слитной жестовой речи. Основным отличием данной задачи от задачи распознавания статических жестов является наличие временных признаков и зачастую отсутствие предварительной разметки (т. е. ассоциации последовательностей кадров с жестами). Другую проблему, связанную с распознаванием слитной речи, представляет так называемая эпентеза — межжестовые движения, возникающие в потоке речи [44]. Появление больших корпусов в свободном доступе (начиная с RWTHPHOENIX-Weather-2014 и других из табл. 1) сделало возможным применение методов

■ **Таблица 3.** Современные нейросетевые модели, применяющиеся для распознавания слитной жестовой речи
 ■ **Table 3.** Current NN-based models for continuous sign language recognition

| Ссылка | Тип нейросетевой модели | Архитектура | Характеристики |
|--------|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [45] | CNN+LSTM+ скрытая марковская модель | Google-LeNet | Использование нескольких модальностей: обучение на размеченных изображениях руки и рта |
| [46] | 3D CNN+Bi-LSTM | LS-HAN | Двухпоточная сеть: одновременно обрабатываются область руки и весь кадр в целом |
| [47] | 3D CNN+LSTM | I3D | Использование псевдометок |
| [48] | 3D CNN, Bi-LSTM | VGG-S | Поэтапная настройка модели за счет признаков, извлеченных CNN. Использование нескольких модальностей (RGB и оптический поток) |
| [49] | 3D CNN | 3D-ResNet | Использование классификаторов лемм и <i>n</i> -граммов для определения слов в высказывании |

машинного обучения для распознавания слитной жестовой речи. Сегодня основным способом обработки жестов в потоке речи является применение различных архитектур CNN и LSTM (табл. 3).

Ряд нейросетевых моделей из табл. 3 позволяют работать с несколькими модальностями. Так, в [50] описана иерархическая двухпоточная архитектура CNN, предназначенная для обнаружения и классификации жестов на основе RGB- и 3D-модели.

В работе [51] представлена гибридная архитектура CNN для распознавания жестов в формате RGB-D, нейросетевая модель, которая извлекает пространственно-временные характеристики двух модальностей с использованием комбинации 3D CNN и LSTM. Временная информация входных данных модели кодируется с использованием двухпоточной архитектуры, основанной на уменьшенной модели сети ResNet-10.

Выводы по разделу

Как показано, основные направления интеллектуального анализа жестов и жестовой речи охватывают отслеживание и определение конфигурации рук, анализ временных и пространственных характеристик жеста, а также цепочек жестов (рис. 2).

Методы оценки конфигурации руки можно разделить на 2D и 3D. Большинство современных моделей ориентированы на работу с 3D-данными; тезис о том, что карты глубины больше подходят для решения этой задачи, выдвигается и в ряде обзоров, например [1, 41]. В то же время очевидно, что возможности CNN ограничиваются работой со статическими изображениями, и эту архитектуру необходимо объединить с LSTM для решения задачи оценки конфигурации в динамических сценах. Эффективность CNN существенно повышается в том случае, если в процессе обучения модели используются предварительные знания о геометрии руки [52].



■ **Рис. 2.** Основные задачи из области автоматического распознавания жестов

■ **Fig. 2.** The main tasks in the field of automatic gesture recognition

Наилучшие результаты для слитной речи показывают модели, основанные на архитектурах типа CNN + LSTM. Основной проблемой распознавания слитной речи является отсутствие предварительных знаний о границах жестов, т. е. временной разметки. Как следует из настоящего обзора, именно комбинация CNN и LSTM позволяет решить последнюю проблему. Из табл. 3 видно, что наиболее перспективным оказывается совмещение модальностей.

Заключение

В настоящей статье были рассмотрены современные методы и подходы к задаче распознавания жестов и жестовых языков. Можно сформулировать ряд проблем, решить которые необходимо для создания системы распознавания жестовых языков.

1. Одной из основных модальностей жестовых языков является визуальная модальность. Из этого следует, что эффективная система распознавания жестового языка требует решения ряда задач из области компьютерного зрения. К основным проблемам из этой области относятся шумы,

конволюции, вариации размеров и оттенков артикуляторов, динамическая освещенность.

2. В настоящий момент основные задачи, стоящие перед создателями систем автоматического распознавания жестов, сводятся к поиску эффективных методов детектирования и распознавания конфигурации рук, определения конфигурации артикуляторов, распознавания динамических жестов в потоке речи.

В последние годы был создан ряд методов, позволяющих достаточно уверенно решать первые две проблемы. Анализ применения глубокого машинного обучения для решения третьей задачи позволяет сформулировать следующую проблему.

3. Немногочисленность корпусов жестовых языков в открытом доступе. Сбор корпусов жестовых языков достаточно трудоемок из-за относительно небольшого количества записей и отсутствия общепринятых систем нотации жестовых языков.

На основании представленного обзора авторы делают вывод, что наиболее эффективным способом решения проблем, обозначенных в п. 1, будет применение моделей, работающих с данными в формате 3D. Использование массива сенсоров, поддерживающих создание карты глубины, позволяет точно моделировать кисть руки в трехмерном пространстве, а наличие больших баз данных дает возможность проводить автоматическую разметку полученного набора данных.

Анализ современных подходов позволяет с достаточной уверенностью утверждать, что эффективным решением задач, обозначенных в п. 2, будет одновременное извлечение пространственных и временных признаков жеста с использованием комбинации архитектур CNN и LSTM. 3D сверточная LSTM-сеть за счет хранения 3D пространственной информации может формировать более эффективные пространственно-временные характеристики жеста.

Наконец, решение проблемы набора данных, в конечном счете, сильно зависит от жестового языка, с которым работает исследователь. Авторы настоящей статьи представили собственный набор данных для русского жестового языка в трехмерном формате [53]; впоследствии этот набор данных использовался для системы автоматического распознавания жестов на русском жестовом языке [54–56].

Финансовая поддержка

Аналитический обзор методов и решений, применяемых для распознавания жестов при помощи глубокого обучения, выполнен за счет гранта Российского научного фонда (№ 21-71-00141, <https://rscf.ru/project/21-71-00141/>), исследование жестовых корпусов и наборов данных проведено в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0005.

Литература

1. Koller O. Quantitative survey of the state of the art in sign language recognition. *arXiv preprint arXiv:2008.09918*, 2020.
2. Rastgoo R., Kiani K., Escalera S. Sign language recognition: A deep survey. *Expert Systems with Applications*, 2021, vol. 164, 113794. doi:10.1016/j.eswa.2020.113794
3. Koller O., Forster J., Ney H. Continuous sign language recognition: Towards large vocabulary statistical recognition systems handling multiple signers. *Computer Vision and Image Understanding*, 2015, vol. 141, pp. 108–125. doi:10.1016/j.cviu.2015.09.013
4. Wan J., Li S. Z., Zhao Y., Zhou S., Guyon I., Escalera S. ChaLearn looking at people RGB-D isolated and continuous datasets for gesture recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2016, pp. 761–769. doi:10.1109/CVPRW.2016.100
5. Madadi M., Escalera S., Carruesco A., Andujar C., Baró X., González J. Occlusion aware hand pose recovery from sequences of depth images. *Proceedings of the 2017 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017)*, 2017, pp. 230–237. doi:10.1109/FG.2017.37
6. Yuan S., Ye Q., Stenger B., Jain S., Kim. T. BigHand2.2M benchmark: Hand pose dataset and state of the art analysis. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 2605–2613. doi:10.1109/CVPR.2017.279
7. Zhang Y., Cao C., Cheng J., Lu H. EgoGesture: A new dataset and benchmark for egocentric hand gesture recognition. *Proceedings of the IEEE Transactions on Multimedia (TMM)*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 1038–1050. doi:10.1109/TMM.2018.2808769
8. Camgoz N., Hadfield S., Koller S., Ney H., Bowden R. Neural sign language translation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 7784–7793. doi:10.1109/CVPR.2018.00812
9. Rastgoo R., Kiani K., Escalera S. Hand sign language recognition using multi-view hand skeleton. *Expert Systems with Applications*, 2020, vol. 150, ID 113336. doi:10.1016/j.eswa.2020.113336
10. Moon G., Yu S. I., Wen H., Shiratori T., Lee K. M. InterHand2.6M: A dataset and baseline for 3D interacting hand pose estimation from a single RGB image.

- Proceedings of the Computer Vision — ECCV 2020: 16th European Conference*, Glasgow, 2020, pp. 548–564. doi:10.1007/978-3-030-58565-5_33
11. **Li D., Rodriguez Ch., Yu X.** Word-level deep sign language recognition from video: A new large-scale dataset and methods comparison. *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2020, pp. 1459–1469. doi:10.1109/WACV45572.2020.9093512
 12. **Sincan O. M., Keles H. Y.** AUTSL: A large scale multi-modal turkish sign language dataset and baseline methods. *IEEE Access*, 2020 vol. 8, pp. 181340–181355. doi:10.1109/ACCESS.2020.3028072
 13. **Starmans M., Voort van der S., Castillo Tovar J., Veenland J., Klein S., Niessen W.** Radiomics: Data Mining Using Quantitative Medical Image Features. In: *Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*. Kevin Zhou S., Daniel Rueckert D., Fichtinger G. (Eds.). Elsevier Science, 2020. Pp. 429–456. doi:10.1016/B978-0-12-816176-0.00023-5
 14. **Perimal M., Basah S. N., Safar M. J. A., Yazid H.** Hand-gesture recognition-algorithm based on finger counting. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 2018, vol. 10(1–13), pp. 19–24.
 15. **Ren S., He K., Girshick R., Sun J.** Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, vol. 39(6), pp. 1137–1149. doi:10.1109/TPAMI.2016.2577031
 16. **Li W.** Analysis of object detection performance based on Faster R-CNN. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1827, ID 012085. doi:10.1088/1742-6596/1827/1/012085
 17. **Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A.** You Only Look Once: unified, real-time object detection. *Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 779–788. doi:10.1109/CVPR.2016.91
 18. **Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy Ch., Reed S., Fu Ch.-Y., Berg A. C.** SSD: Single Shot MultiBox Detector. In: *Computer Vision — ECCV 2016*. Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M. (Eds). Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham, 2016. Vol. 9905. Pp. 21–37. doi:10.1007/978-3-319-46448-0_2
 19. **Haque A., Peng B., Luo Z., Alahi A., Yeung S., Fei-Fei L.** Towards Viewpoint Invariant 3D Human Pose Estimation. In: *Computer Vision — ECCV 2016*. Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M. (Eds). Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2016. Vol. 9905. Pp. 160–177. doi:10.1007/978-3-319-46448-0_10
 20. **Marín-Jiménez M., Romero-Ramírez F., Muñoz-Salinas R., Medina-Carnicer R.** 3D human pose estimation from depth maps using a deep combination of poses. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, vol. 55, pp. 627–639. doi:10.1016/j.jvcir.2018.07.010
 21. **Zhou Y., Jiang G., Lin Y.** A novel finger and hand pose estimation technique for real-time hand gesture recognition. *Pattern Recognition*, 2016, vol. 49, pp. 102–114. doi:10.1016/j.patcog.2015.07.014
 22. **Molina J., Pajuelo J. A., Martínez J. M.** Real-time motion-based hand gestures recognition from time-of-flight video. *Journal of Signal Processing Systems*, 2017, vol. 86, no. 1, pp. 17–25. doi:10.1007/s11265-015-1090-5
 23. **Devineau G., Moutarde F., Xi W., Yang J.** Deep learning for hand gesture recognition on skeletal data. *Proceedings of the 2018 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2018)*, Xi'an, China, 2018, pp. 106–113. doi:10.1109/FG.2018.00025
 24. **Ma X., Peng J.** Kinect sensor-based long-distance hand gesture recognition and fingertip detection with depth information. *Journal of Sensors*, 2018, vol. 2018, ID 5809769. doi:10.1155/2018/5809769
 25. **Tekin B., Bogo F., Pollefeys M.** H+O: Unified egocentric recognition of 3D hand-object poses and interactions. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 4511–4520. doi:10.1109/CVPR.2019.00464
 26. **Raheja J. L., Mishra A., Chaudhary A.** Indian sign language recognition using SVM. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 434–441. doi:10.1134/S1054661816020164
 27. **Grif M. G., Kugaevskikh A. V.** Recognition of deaf gestures based on a bio-inspired neural network. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1661, ID 012038. doi:10.1088/1742-6596/1661/1/012038
 28. **Dibra E., Melchior S., Balkis A., Wolf T., Oztireli C., Gross M.** Monocular RGB hand pose inference from unsupervised refinable nets. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2018, pp. 1075–1085. doi:10.1109/CVPRW.2018.00155
 29. **Sinha A., Choi C., Ramani K.** Deephand: Robust hand pose estimation by completing a matrix imputed with deep features. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 4150–4158. doi:10.1109/CVPR.2016.450
 30. **Wei S., Ramakrishna V., Kanade T., Sheikh Y.** Convolutional pose machines. *Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 4724–4732. doi:10.1109/CVPR.2016.511
 31. **Zimmermann C., Brox T.** Learning to estimate 3D hand pose from single RGB images. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 4903–4911. doi:10.1109/ICCV.2017.525
 32. **Mueller F., Bernard F., Sotnychenko O., Mehta D., Sridhar S., Casas D., Theobalt C.** GANerated hands for real-time 3D hand tracking from monocular RGB. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vi-*

- sion and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 49–59. doi:10.1109/CVPR.2018.00013
33. Baek S., Kim K. I., Kim T. K. Augmented skeleton space transfer for depth-based hand pose estimation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 8330–8339. doi:10.1109/CVPR.2018.00869
 34. Zhu J. Y., Park T., Isola P., Efros A. A. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 2223–2232. doi:10.1109/ICCV.2017.244
 35. Ge L., Liang H., Yuan J., Thalmann D. 3D convolutional neural networks for efficient and robust hand pose estimation from single depth images. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 1991–2000. doi:10.1109/CVPR.2017.602
 36. Tang D., Chang H. J., Tejani A., Kim T. Latent regression forest: structured estimation of 3D articulated hand posture. *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014, pp. 3786–3793. doi:10.1109/CVPR.2014.490
 37. Spurr A., Song J., Park S., Hilliges O. Cross-modal deep variational hand pose estimation. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 89–98. doi:10.1109/CVPR.2018.00017
 38. Moon G., Chang J., Lee K. V2V-PoseNet: Voxel-to-voxel prediction network for accurate 3D hand and human pose estimation from a single depth map. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 5079–5088. doi:10.1109/CVPR.2018.00533
 39. Li Y., Xue Z., Wang Y., Ge L., Ren Z., Rodriguez J. End-to-end 3D hand pose estimation from stereo cameras. *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC-2019)*, 2019, pp. 38.11–38.13. doi:10.5244/C.33.38
 40. Gomez-Donoso F., Orts-Escolano S., Cazorla M. Accurate and efficient 3D hand pose regression for robot hand teleoperation using a monocular RGB camera. *Expert Systems with Applications*, 2019, vol. 136, pp. 327–337. doi:10.1016/j.eswa.2019.06.055
 41. Supancic J., Rogez G., Yang Y., Shotton J., Ramana D. Depth-based hand pose estimation: methods, data, and challenges. *International Journal of Computer Vision*, 2018, vol. 126, no. 11, pp. 1180–1198. doi:10.1007/s11263-018-1081-7
 42. Sun X., Wei Y., Liang S., Tang X., Sun J. Cascaded hand pose regression. *Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 824–832. doi:10.1109/CVPR.2015.7298683
 43. Zhang J., Jiao J., Chen M., Qu L., Xu X., Yang Q. A hand pose tracking benchmark from stereo matching. *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2017, pp. 982–986. doi:10.1109/ICIP.2017.8296428
 44. Choudhury A., Talukdar A. K., Sarma K. K., Bhuyan M. K. An adaptive thresholding-based movement epenthesis detection technique using hybrid feature set for continuous fingerspelling recognition. *SN Computer Science*, 2021, vol. 2(128). doi:10.1007/s42979-021-00544-5
 45. Koller O., Camgoz N. C., Ney H., Bowden R. Weakly supervised learning with multi-stream CNN-LSTM-HMMs to discover sequential parallelism in sign language videos. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, vol. 42, no. 9, pp. 2306–2320. doi:10.1109/TPAMI.2019.2911077
 46. Huang J., Zhou W., Zhang Q., Li H., Li W. Video-based sign language recognition without temporal segmentation. *Proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2018, pp. 2257–2264.
 47. Joze H. R. V., Koller O. MS-ASL: A large-scale data set and benchmark for understanding American sign language. *arXiv preprint arXiv:1812.01053*, 2018.
 48. Cui R., Liu H., Zhang C. A deep neural framework for continuous sign language recognition by iterative training. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2019, vol. 21, no. 7, pp. 1880–1891. doi:10.1109/TMM.2018.2889563
 49. Wei C., Zhou W., Pu J., Li H. Deep grammatical multi-classifier for continuous sign language recognition. *Proceedings of the 2019 IEEE Fifth International Conference on Multimedia Big Data (BigMM)*, 2019, pp. 435–442. doi:10.1109/BigMM.2019.00027
 50. Elboushaki A., Hannane R., Afdel K., Koutti L. MultiD-CNN: A multi-dimensional feature learning approach based on deep convolutional networks for gesture recognition in RGB-D image sequences. *Expert Systems with Applications*, 2020, vol. 139, ID 112829. doi:10.1016/j.eswa.2019.112829
 51. Xu C., Zhou J., Cai W., Jiang Y., Li Y., Liu Y. Robust 3D hand detection from a single RGB-D image in unconstrained environments. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 21, ID 6360. doi:10.3390/s20216360
 52. Zhou X., Wan Q., Zhang W., Xue X., Wei Y. Model-based deep hand pose estimation. *arXiv preprint arXiv:1606.06854*, 2016.
 53. Кагиров И. А., Рюмин Д. А., Аксёнов А. А., Карпов А. А. Мультимедийная база данных жестов русского жестового языка в трехмерном формате. *Вопросы языкознания*, 2020, № 1, с. 104–123. doi:10.31857/S0373658X0008302-1
 54. Kagirov I., Ryumin D., Axyonov A. Method for multimodal recognition of one-handed sign language gestures through 3D convolution and LSTM neural networks. *Proceedings of the 21th International Conference on Speech and Computer (SPECOM-2019)*, Springer, LNAI, 2019, vol. 116582019, pp. 191–200. doi:10.1007/978-3-030-26061-3_20

55. Рюмин Д. Метод автоматического видеоанализа движений рук и распознавания жестов в человеко-машинных интерфейсах. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2020, т. 20, № 4, с. 525–531. doi:10.17586/2226-1494-2020-20-4-525-531

56. Ryumin D., Kagirow I., Axyonov A., Pavlyuk N., Saveliev A., Kipyatkova I., Zelezny M., Mporas I., Karpov A. A Multimodal user interface for an assistive robotic shopping cart. *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 12, ID 2093, pp. 1–25. doi:10.3390/electronics9122093

UDC 004.93'12

doi:10.31799/1684-8853-2021-6-10-20

Analytical review of models and methods for automatic recognition of gestures and sign languages

D. A. Ryumin^a, PhD, Tech., Senior Research, orcid.org/0000-0002-7935-0569, ryumin.d@iias.spb.su

I. A. Kagirow^a, Research Fellow, orcid.org/0000-0003-1196-1117, kagirow@iias.spb.su

A. A. Axyonov^a, Junior Research, orcid.org/0000-0002-7479-2851

A. A. Karpov^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, Principal Researcher, orcid.org/0000-0003-3424-652X

^aSt. Petersburg Federal Research Center of the RAS, 39, 14th Line, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Currently, the recognition of gestures and sign languages is one of the most intensively developing areas in computer vision and applied linguistics. The results of current investigations are applied in a wide range of areas, from sign language translation to gesture-based interfaces. In that regard, various systems and methods for the analysis of gestural data are being developed. **Purpose:** A detailed review of methods and a comparative analysis of current approaches in automatic recognition of gestures and sign languages. **Results:** The main gesture recognition problems are the following: detection of articulators (mainly hands), pose estimation and segmentation of gestures in the flow of speech. The authors conclude that the use of two-stream convolutional and recurrent neural network architectures is generally promising for efficient extraction and processing of spatial and temporal features, thus solving the problem of dynamic gestures and coarticulations. This solution, however, heavily depends on the quality and availability of data sets. **Practical relevance:** This review can be considered a contribution to the study of rapidly developing sign language recognition, irrespective to particular natural sign languages. The results of the work can be used in the development of software systems for automatic gesture and sign language recognition.

Keywords — sign languages, gesture corpus, gesture recognition, hand geometry, machine learning, computer vision, neural network model, digital processing, morphological processing, informative features.

For citation: Ryumin D. A., Kagirow I. A., Axyonov A. A., Karpov A. A. Analytical review of models and methods for automatic recognition of gestures and sign languages. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 10–20 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-10-20

Financial support

The analytical review of methods and solutions applied for deep learning-based gesture recognition was funded by Russian Science Foundation (No 21-71-00141, <https://rscf.ru/project/21-71-00141>), the survey of gesture corpora and datasets was carried out within the framework of the budgetary theme No 0073-2019-0005.

References

- Koller O. Quantitative survey of the state of the art in sign language recognition. *arXiv preprint arXiv:2008.09918*, 2020.
- Rastgoo R., Kiani K., Escalera S. Sign language recognition: A deep survey. *Expert Systems with Applications*, 2021, vol. 164, 113794. doi:10.1016/j.eswa.2020.113794
- Koller O., Forster J., Ney H. Continuous sign language recognition: Towards large vocabulary statistical recognition systems handling multiple signers. *Computer Vision and Image Understanding*, 2015, vol. 141, pp. 108–125. doi:10.1016/j.cviu.2015.09.013
- Wan J., Li S. Z., Zhao Y., Zhou S., Guyon I., Escalera S. ChaLearn looking at people RGB-D isolated and continuous datasets for gesture recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2016, pp. 761–769. doi:10.1109/CVPRW.2016.100
- Madadi M., Escalera S., Carruesco A., Andujar C., Baró X., González J. Occlusion aware hand pose recovery from sequences of depth images. *Proceedings of the 2017 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017)*, 2017, pp. 230–237. doi:10.1109/FG.2017.37
- Yuan S., Ye Q., Stenger B., Jain S., Kim. T. BigHand2.2M benchmark: Hand pose dataset and state of the art analysis. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 2605–2613. doi:10.1109/CVPR.2017.279
- Zhang Y., Cao C., Cheng J., Lu H. EgoGesture: A new dataset and benchmark for egocentric hand gesture recognition. *Proceedings of the IEEE Transactions on Multimedia (TMM)*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 1038–1050. doi:10.1109/TMM.2018.2808769
- Camgoz N., Hadfield S., Koller S., Ney H., Bowden R. Neural sign language translation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 7784–7793. doi:10.1109/CVPR.2018.00812
- Rastgoo R., Kiani K., Escalera S. Hand sign language recognition using multi-view hand skeleton. *Expert Systems with Applications*, 2020, vol. 150, ID 113336. doi:10.1016/j.eswa.2020.113336
- Moon G., Yu S. I., Wen H., Shiratori T., Lee K. M. Inter-Hand2.6M: A dataset and baseline for 3D interacting hand pose estimation from a single RGB image. *Proceedings of the Computer Vision — ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, 2020*, pp. 548–564. doi:10.1007/978-3-030-58565-5_33
- Li D., Rodriguez Ch., Yu X. Word-level deep sign language recognition from video: A new large-scale dataset and meth-

- ods comparison. *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2020, pp. 1459–1469. doi:10.1109/WACV45572.2020.9093512
12. Sincan O. M., Keles H. Y. AUTSL: A large scale multi-modal turkish sign language dataset and baseline methods. *IEEE Access*, 2020 vol. 8, pp. 181340–181355. doi:10.1109/ACCESS.2020.3028072
 13. Starmans M., Voort van der S., Castillo Tovar J., Veenland J., Klein S., Niessen W. *Radiomics: Data Mining Using Quantitative Medical Image Features*. In: *Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*. Kevin Zhou S., Daniel Rueckert D., Fichtinger G. (Eds.). Elsevier Science, 2020. Pp. 429–456. doi:10.1016/B978-0-12-816176-0.00023-5
 14. Perimal M., Basah S. N., Safar M. J. A., Yazid H. Hand-gesture recognition-algorithm based on finger counting. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 2018, vol. 10(1-13), pp. 19–24.
 15. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, vol. 39(6), pp. 1137–1149. doi:10.1109/TPAMI.2016.2577031
 16. Li W. Analysis of object detection performance based on Faster R-CNN. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1827, ID 012085. doi:10.1088/1742-6596/1827/1/012085
 17. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: unified, real-time object detection. *Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 779–788. doi:10.1109/CVPR.2016.91
 18. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy Ch., Reed S., Fu Ch.-Y., Berg A. C. *SSD: Single Shot MultiBox Detector*. In: *Computer Vision — ECCV 2016*. Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M. (Eds). Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham, 2016. Vol. 9905. Pp. 21–37. doi:10.1007/978-3-319-46448-0_2
 19. Haque A., Peng B., Luo Z., Alahi A., Yeung S., Fei-Fei L. *Towards Viewpoint Invariant 3D Human Pose Estimation*. In: *Computer Vision — ECCV 2016*. Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M. (Eds). Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2016. Vol. 9905. Pp. 160–177. doi:10.1007/978-3-319-46448-0_10
 20. Marín-Jiménez M., Romero-Ramirez F., Muñoz-Salinas R., Medina-Carnicer R. 3D human pose estimation from depth maps using a deep combination of poses. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, vol. 55, pp. 627–639. doi:10.1016/j.jvcir.2018.07.010
 21. Zhou Y., Jiang G., Lin Y. A novel finger and hand pose estimation technique for real-time hand gesture recognition. *Pattern Recognition*, 2016, vol. 49, pp. 102–114. doi:10.1016/j.patcog.2015.07.014
 22. Molina J., Pajuelo J. A., Martínez J. M. Real-time motion-based hand gestures recognition from time-of-flight video. *Journal of Signal Processing Systems*, 2017, vol. 86, no. 1, pp. 17–25. doi:10.1007/s11265-015-1090-5
 23. Devineau G., Moutarde F., Xi W., Yang J. Deep learning for hand gesture recognition on skeletal data. *Proceedings of the 2018 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2018)*, Xi'an, China, 2018, pp. 106–113. doi:10.1109/FG.2018.00025
 24. Ma X., Peng J. Kinect sensor-based long-distance hand gesture recognition and fingertip detection with depth information. *Journal of Sensors*, 2018, vol. 2018, ID 5809769. doi:10.1155/2018/5809769
 25. Tekin B., Bogo F., Pollefeys M. H+O: Unified egocentric recognition of 3D hand-object poses and interactions. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 4511–4520. doi:10.1109/CVPR.2019.00464
 26. Raheja J. L., Mishra A., Chaudhary A. Indian sign language recognition using SVM. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 434–441. doi:10.1134/S1054661816020164
 27. Grif M. G., Kugaevskikh A. V. Recognition of deaf gestures based on a bio-inspired neural network. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1661, ID 012038. doi:10.1088/1742-6596/1661/1/012038
 28. Dibra E., Melchior S., Balkis A., Wolf T., Oztireli C., Gross M. Monocular RGB hand pose inference from unsupervised refinable nets. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2018, pp. 1075–1085. doi:10.1109/CVPRW.2018.00155
 29. Sinha A., Choi C., Ramani K. Deephand: Robust hand pose estimation by completing a matrix imputed with deep features. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 4150–4158. doi:10.1109/CVPR.2016.450
 30. Wei S., Ramakrishna V., Kanade T., Sheikh Y. Convolutional pose machines. *Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 4724–4732. doi: 10.1109/CVPR.2016.511
 31. Zimmermann C., Brox T. Learning to estimate 3D hand pose from single RGB images. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 4903–4911. doi:10.1109/ICCV.2017.525
 32. Mueller F., Bernard F., Sotnychenko O., Mehta D., Sridhar S., Casas D., Theobalt C. GANerated hands for real-time 3D hand tracking from monocular RGB. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 49–59. doi:10.1109/CVPR.2018.00013
 33. Baek S., Kim K. I., Kim T. K. Augmented skeleton space transfer for depth-based hand pose estimation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 8330–8339. doi:10.1109/CVPR.2018.00869
 34. Zhu J. Y., Park T., Isola P., Efros A. A. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 2223–2232. doi:10.1109/ICCV.2017.244
 35. Ge L., Liang H., Yuan J., Thalmann D. 3D convolutional neural networks for efficient and robust hand pose estimation from single depth images. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 1991–2000. doi:10.1109/CVPR.2017.602
 36. Tang D., Chang H. J., Tejani A., Kim T. Latent regression forest: structured estimation of 3D articulated hand posture. *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014, pp. 3786–3793. doi:10.1109/CVPR.2014.490
 37. Spurr A., Song J., Park S., Hilliges O. Cross-modal deep variational hand pose estimation. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 89–98. doi:10.1109/CVPR.2018.00017
 38. Moon G., Chang J., Lee K. V2V-PoseNet: Voxel-to-voxel prediction network for accurate 3D hand and human pose estimation from a single depth map. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 5079–5088. doi:10.1109/CVPR.2018.00533
 39. Li Y., Xue Z., Wang Y., Ge L., Ren Z., Rodriguez J. End-to-end 3D hand pose estimation from stereo cameras. *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC-2019)*, 2019, pp. 38.11–38.13. doi:10.5244/C.33.38
 40. Gomez-Donoso F., Orts-Escolano S., Cazorla M. Accurate and efficient 3D hand pose regression for robot hand teleoperation using a monocular RGB camera. *Expert Systems with Applications*, 2019, vol. 136, pp. 327–337. doi:10.1016/j.eswa.2019.06.055
 41. Supancic J., Rogez G., Yang Y., Shotton J., Ramana D. Depth-based hand pose estimation: methods, data, and challenges. *International Journal of Computer Vision*, 2018, vol. 126, no. 11, pp. 1180–1198. doi:10.1007/s11263-018-1081-7
 42. Sun X., Wei Y., Liang S., Tang X., Sun J. Cascaded hand pose regression. *Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 824–832. doi:10.1109/CVPR.2015.7298683
 43. Zhang J., Jiao J., Chen M., Qu L., Xu X., Yang Q. A hand pose tracking benchmark from stereo matching. *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2017, pp. 982–986. doi:10.1109/ICIP.2017.8296428
 44. Choudhury A., Talukdar A. K., Sarma K. K., Bhuyan M. K. An adaptive thresholding-based movement epenthesis detection technique using hybrid feature set for continuous fingerspelling recognition. *SN Computer Science*, 2021, vol. 2(128). doi:10.1007/s42979-021-00544-5
 45. Koller O., Camgoz N. C., Ney H., Bowden R. Weakly supervised learning with multi-stream CNN-LSTM-HMMs to discover sequential parallelism in sign language videos. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, vol. 42, no. 9, pp. 2306–2320. doi:10.1109/TPAMI.2019.2911077
 46. Huang J., Zhou W., Zhang Q., Li H., Li W. Video-based sign language recognition without temporal segmentation. *Pro-*

- ceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2018, pp. 2257–2264.
47. Joze H. R. V., Koller O. MS-ASL: A large-scale data set and benchmark for understanding American sign language. *arXiv preprint arXiv:1812.01053*, 2018.
 48. Cui R., Liu H., Zhang C. A deep neural framework for continuous sign language recognition by iterative training. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2019, vol. 21, no. 7, pp. 1880–1891. doi:10.1109/TMM.2018.2889563
 49. Wei C., Zhou W., Pu J., Li H. Deep grammatical multi-classifier for continuous sign language recognition. *Proceedings of the 2019 IEEE Fifth International Conference on Multimedia Big Data (BigMM)*, 2019, pp. 435–442. doi:10.1109/BigMM.2019.00027
 50. Elboushaki A., Hannane R., Afdel K., Koutti L. MultiD-CNN: A multi-dimensional feature learning approach based on deep convolutional networks for gesture recognition in RGB-D image sequences. *Expert Systems with Applications*, 2020, vol. 139, ID 112829. doi:10.1016/j.eswa.2019.112829
 51. Xu C., Zhou J., Cai W., Jiang Y., Li Y., Liu Y. Robust 3D hand detection from a single RGB-D image in unconstrained environments. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 21, ID 6360. doi:10.3390/s20216360
 52. Zhou X., Wan Q., Zhang W., Xue X., Wei Y. Model-based deep hand pose estimation. *arXiv preprint arXiv:1606.06854*, 2016.
 53. Kagirow I. A., Ryumin D. A., Axyonov A. A., Karpov A. A. Multimedia database of Russian sign language items in 3D. *Voprosy jazykoznanija*, 2020, vol. 1, pp. 104–123 (In Russian). doi:10.31857/S0373658X0008302-1
 54. Kagirow I., Ryumin D., Axyonov A. Method for multi-modal recognition of one-handed sign language gestures through 3D convolution and LSTM neural networks. *Proceedings of the 21th International Conference on Speech and Computer (SPECOM-2019)*, Springer, LNAI, 2019, vol. 116582019, pp. 191–200. doi:10.1007/978-3-030-26061-3_20
 55. Ryumin D. Automated hand detection method for tasks of gesture recognition in human-machine interfaces. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 525–531 (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2020-20-4-525-531
 56. Ryumin D., Kagirow I., Axyonov A., Pavlyuk N., Saveliev A., Kipyatkova I., Zelezny M., Mporas I., Karpov A. A multi-modal user interface for an assistive robotic shopping cart. *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 12, ID 2093, pp. 1–25. doi:10.3390/electronics9122093

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

Аппаратно-программный комплекс для удаленного мониторинга и контроля состояния беременных женщин

И. П. Корнеева^а, магистрант, инженер, orcid.org/0000-0002-7587-5317

К. А. Крамарь^а, магистрант, orcid.org/0000-0002-0122-9005

Е. А. Семенова^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-5608-3544

А. М. Сергеев^б, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-4788-9869

З. М. Юлдашев^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-1075-3420, zmyuldashev@etu.ru

^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Профессора Попова ул., 5, Санкт-Петербург, 197376, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Введение: проблема удаленного мониторинга состояния здоровья людей стала особенно актуальной в настоящее время в связи с быстрым распространением опасных инфекционных и вирусных заболеваний, таких как COVID-19. Особенно сложным этот период оказался для беременных женщин. По статистике Росстата, в 2020 году материнская смертность в России возросла на 24,4 % по сравнению с 2019 годом и достигла 11,2 на 100 000 новорожденных детей. Это худший показатель с 2013 года. В сложившихся условиях появилась потребность в системах удаленного мониторинга, которые позволили бы дистанционно, с использованием инструментальных средств вне лечебного учреждения, осуществлять мониторинг состояния здоровья беременной женщины. **Цель:** разработка структуры и обоснование выбора элементов аппаратно-программного комплекса для удаленного мониторинга вне лечебного учреждения и контроля состояния беременной женщины в условиях активной жизнедеятельности. **Результаты:** разработан автоматизированный опросник беременной женщины в соответствии с методическими рекомендациями Министерства здравоохранения РФ, обеспечивающий количественную оценку текущего состояния беременной женщины для изучения динамики состояния ее здоровья. На основании результатов инструментальных исследований по 30 показателям функционирования организма пациентки и данных опросника сформирован набор диагностически значимых показателей, для каждого из которых установлен диапазон значений нормы, тревоги и патологии. Разработан экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса и проведена апробация его работы, режимов съема биомедицинских данных по каналу оценки комплекса биохимических показателей мочи. Проведены экспериментальные исследования алгоритмов обработки и анализа совокупности биомедицинских данных, результаты которых подтвердили правомерность предложенных решений по разработке аппаратно-программного комплекса. **Практическая значимость:** результаты проведенных исследований позволяют утвердительно ответить на вопрос о возможности удаленного мониторинга вне лечебного учреждения и контроля состояния здоровья беременной женщины в целях прогнозирования осложнения течения беременности, обосновать выбор измерительных каналов для регистрации комплекса биомедицинских сигналов и данных, алгоритмов обработки и анализа информации.

Ключевые слова – инструментальные методы, обработка биомедицинских сигналов и данных, оценка текущего состояния, удаленный мониторинг и контроль, состояние, беременные женщины.

Для цитирования: Корнеева И. П., Крамарь К. А., Семенова Е. А., Сергеев А. М., Юлдашев З. М. Аппаратно-программный комплекс для удаленного мониторинга и контроля состояния беременных женщин. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 6, с. 21–30. doi:10.31799/1684-8853-2021-6-21-30

For citation: Korneeva I. P., Kramar K. A., Semenova E. A., Sergeev A. M., Yuldashev Z. M. Hardware and software complex for remote monitoring and control of a pregnant woman's health state. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 21–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-21-30

Введение

Проблема удаленного мониторинга состояния здоровья людей стала особенно актуальной в настоящее время, в том числе в связи с быстрым распространением опасных инфекционных и вирусных заболеваний, таких как COVID-19 [1, 2]. Многие больницы были перепрофилированы для спасения пациентов с новой коронавирусной инфекцией, часть из них была закрыта на карантин. Некоторые лечебные учреждения не справлялись с возросшей нагрузкой и не могли обеспечить оказание своевременной медицинской помо-

щи всем пациентам. Люди, которым требовался постоянный медицинский контроль, пропускали плановое посещение медицинских учреждений из-за необходимости соблюдать полную изоляцию. В таких условиях беременные женщины были вынуждены сократить количество посещений акушера-гинеколога в дородовой период, что не могло не отразиться на случаях пропуска осложнений у женщины и ребенка. По статистике Росстата, в 2020 году материнская смертность в России возросла на 24,4 % по сравнению с 2019 годом и достигла 11,2 на 100 000 новорожденных детей, это самый худший показатель

с 2013 года. В сложившихся условиях появилась потребность в системах удаленного мониторинга, которые позволили бы с использованием инструментальных средств вне лечебного учреждения осуществлять мониторинг состояния здоровья беременной женщины, прогнозировать возникновение осложнений течения беременности и своевременно извещать врача об ухудшении состояния здоровья беременной [3–5].

Проблема удаленного мониторинга сегодня успешно решается с применением информационно-телекоммуникационных технологий, технологий цифровой медицины [6, 7], методов съема и регистрации биомедицинских сигналов вне лечебного учреждения в условиях повседневной деятельности человека [8–14], оценки комплекса диагностически значимых показателей, интеллектуальной обработки полученных данных [15, 16]. Однако в настоящее время отсутствуют методы удаленной комплексной оценки состояния здоровья беременной женщины и прогнозирования осложнения течения беременности с использованием современных информационных технологий и искусственного интеллекта. В статье предлагается один из путей разрешения данного положения.

Методика оценки текущего состояния, мониторинга и контроля состояния беременной женщины

Предлагаемый подход для реализации удаленного мониторинга и контроля состояния здоровья беременной женщины основан:

- на периодическом съеме и регистрации биомедицинских сигналов и данных вне лечебного учреждения;

- на оценке текущего состояния беременной женщины по нескольким группам диагностически значимых показателей, отражающих состояние сердечно-сосудистой, дыхательной и эндокринной системы, а также по группе биохимических показателей и маркеров специфических осложнений беременности [16–19].

В дополнение к инструментальным обследованиям, направленным на сбор данных о диагностически значимых показателях, оценка текущего состояния здоровья беременной женщины проводится на основании автоматизированного опросника, разработанного в соответствии с методическими рекомендациями Министерства здравоохранения РФ (Приказ МЗ РФ от 20.10.2020 № 1130н «Об утверждении Порядка оказания медицинской помощи по профилю «акушерство и гинекология»).

При проведении процедуры мониторинга используется адаптивная дискретизация [20], суть которой состоит в изменении периодичности сбора данных и последующей оценке состояния на ос-

нове анализа динамики комплекса диагностически значимых показателей состояния здоровья, а также сочетанного проявления признаков осложнения течения беременности. Как только какой-либо из мониторируемых показателей достигает границы нормы, его необходимо тщательно отслеживать и сократить промежутки времени между последовательными измерениями. Например, если анализ проводится раз в неделю, то при возникновении подозрения на патологию периодичность анализа может быть снижена до ежедневной.

Алгоритмы обработки полученных данных и последующей оценки текущего состояния и контроля динамики состояния беременной женщины основаны на использовании технологии распределенных вычислений, часть из которых выполняется на носимом компьютере (смартфоне) беременной женщины, который является агрегатором регистрируемых с пациентки биомедицинских сигналов и осуществляет структурирование информации и ее передачу на сервер лечебного учреждения. Вторая часть вычислений, связанная с оценкой текущего состояния пациентки, мониторингом и контролем состояния здоровья, и прогнозирование осложнения течения беременности выполняются на сервере лечебного учреждения, а результаты передаются на носимый компьютер лечащего врача.

На протяжении всего исследования диагностически значимые показатели делятся на группы по степени значимости. Для каждого из показателей определяется зона нормы, зона тревоги и зона патологии в соответствии с медицинскими стандартами. В дальнейшем диапазон значений по каждому показателю по результатам длительного мониторинга уточняется в соответствии с индивидуальной нормой пациентки. При оценке текущего состояния и контроле динамики все диагностически значимые показатели классифицируются по трем группам: находящиеся в норме; находящиеся на нижней или верхней границе нормы; выходящие за границы нормы. При формировании отчета о проведенном исследовании показатели помечаются зеленым, желтым и красным цветом соответственно. Лечащему врачу в первую очередь предоставляются сведения о показателях, имеющих приоритетную значимость и при этом вышедших за границы нормы или требующих более пристального внимания.

Структура аппаратно-программного комплекса для удаленного мониторинга и контроля состояния беременной женщины

Предлагаемая обобщенная структура аппаратно-программного комплекса для удаленного мониторинга и контроля состояния беремен-

ной женщины (рис. 1) состоит из нескольких уровней.

На первом уровне проводится съем и регистрация биомедицинских сигналов и данных вне лечебного учреждения, обеспечивающих комплексную оценку текущего состояния организма на принципах системной медицины. При этом осуществляется сбор данных о более 30 показателях, среди которых показатели функционирования различных систем организма, таких как сердечно-сосудистая, эндокринная, дыхательная, а также данные биохимических исследований, отражающие динамику биохимических показателей мочи и свертываемости крови. На данном этапе становится возможным выявление индивидуальных особенностей функционирования организма на всех этапах беременности при сочетанном проявлении различных хронических заболеваний и воздействии внешних возбудителей.

Важным условием при выборе измерительных каналов является их соответствие стандартам оснащения в области акушерства и гинекологии, закрепленным в приказе Минздрава России (Приказ МЗ РФ от 20.10.2020 № 1130н «Об утверждении Порядка оказания медицинской помощи по профилю «акушерство и гинекология»), а также наличие сертификата о государственной регистрации медицинского изделия на территории РФ. В соответствии с требованиями в качестве измерительных каналов для аппаратно-программного комплекса выбраны портативные биохимические анализаторы мочи и свертываемости крови; портативные кардиомонитор, спирометр, глюкометр; автоматический тонометр.

Использование данных приборов в совокупности позволяет обеспечить мониторинг и кон-

троль состояния здоровья беременной женщины по всем необходимым показателям. Полученные биомедицинские сигналы и данные передаются через канал Bluetooth на второй уровень аппаратно-программного комплекса, представленный носимым компьютером пациентки, в качестве которого используется высокопроизводительный смартфон или планшет.

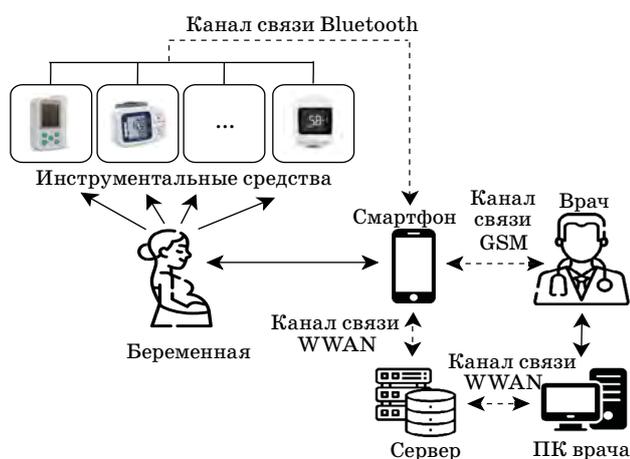
На втором уровне осуществляется структурирование информации о текущем состоянии здоровья беременной женщины с учетом степени диагностической значимости показателей, коррекция показателей индивидуальной нормы, учет сочетанного проявления нескольких факторов обострения заболевания, а также составляется формализованное описание состояния здоровья беременной женщины на основании комплекса диагностически значимых показателей. При необходимости проводится предобработка биосигналов, полученных с измерительных каналов. Здесь же происходит разбиение комплекса диагностически значимых показателей на группы по степени значимости.

После завершения обработки полученной информации формируется отчет, отражающий текущее значение диагностически значимых показателей пациентки с указанием зоны расположения (норма, тревога, патология), и передается по каналу связи через WWAN на сервер лечебного учреждения.

На сервере лечебного учреждения, выступающего в роли третьего уровня комплекса, осуществляется обработка полученной информации, а также определяются критерии, позволяющие прогнозировать предболезненное состояние и состояние осложнения течения беременности, при этом учитывается сочетание влияния факторов, усугубляющих осложнение ее течения. При ограниченном контингенте пользователей третий уровень может быть представлен компьютером лечащего врача. Итоговый отчет с рекомендациями вариантов коррекции состояния, при необходимости, передается на персональный компьютер врача, являющийся четвертым, завершающим уровнем комплекса.

Автоматизированный опросник для оценки состояния беременной женщины

В медицинской практике возможны случаи, когда результаты инструментального обследования не позволяют выявить состояния, угрожающие жизни и здоровью беременной женщины, хотя она обращает внимание врача на ощущение дискомфорта. Для исключения неопределенности в таких случаях врач пытается оценить



■ **Рис. 1.** Обобщенная структура аппаратно-программного комплекса удаленного мониторинга и контроля состояния беременной женщины

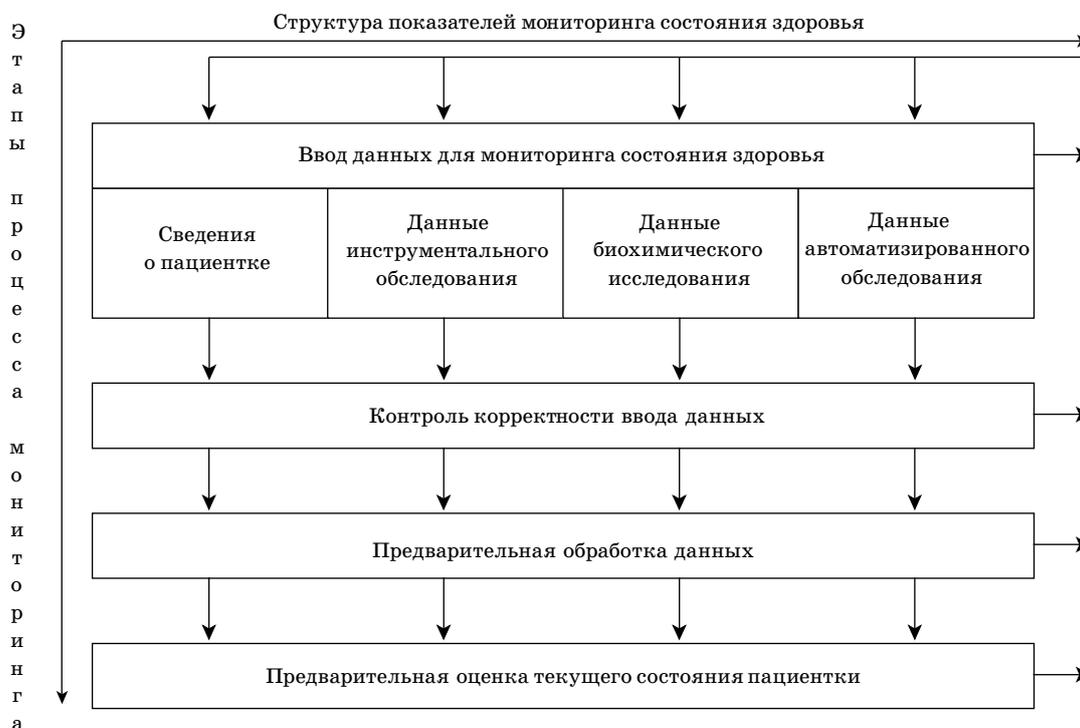
■ **Fig. 1.** Generalized structure of the hardware and software complex for remote monitoring and control of a pregnant woman's health state

субъективные ощущения состояния беременной. Для ускорения и облегчения процесса сбора данных, а также количественной оценки динамики состояния беременной предлагается использовать автоматизированный опросник. Автоматизированный опросник — программное обеспечение, устанавливаемое на смартфон беременной (рис. 2).

Блок ввода данных для мониторинга состояния здоровья состоит из четырех подблоков. Сведения о пациентке вводятся в программу единожды при регистрации и включают в себя персональные данные женщины, акушерский, гинекологический, семейный анамнез и анамнез жизни. Данные инструментального обследования и биохимического исследования заполняются беременной женщиной по мере проведения исследований. Исследования проводятся по комплексу биохимических показателей, показателей системы дыхания, сердечно-сосудистой, эндокринной и других систем организма. Данные автоматизированного обследования включают в себя вопросы об общем состоянии беременной женщины и о диагностически значимых признаках, которые невозможно оценить количественно. Полученные ответы позволяют врачу оценить субъективное состояние беременной, которое является важным диагностическим признаком ряда заболеваний, поскольку в некоторых случа-

ях невозможно зафиксировать наличие патологии с помощью имеющихся инструментальных средств. Далее производится контроль корректности введенных данных и их предварительная обработка для последующей оценки состояния здоровья беременной женщины.

Полученные данные представляют собой комплекс диагностически значимых показателей. Для получения интегральной оценки состояния здоровья беременной женщины необходимо оценить значимость каждого из используемых показателей. Для этого был выбран метод анализа иерархий [21]. Метод заключается в иерархическом представлении элементов, определяющих суть проблемы. Происходит декомпозиция проблемы на более простые составляющие части и дальнейшая обработка получившейся последовательности суждений по парным сравнениям лицом, являющимся специалистом по профилю «акушерство и гинекология». В результате в численном виде выражается относительная интенсивность взаимодействия элементов в иерархии, т. е. указывается влияние каждого из факторов на суть проблемы. Выбранный метод обладает высокой универсальностью, прост в использовании и требует глубокого включения экспертов в решение задачи, что снижает вероятность возникновения ошибок при использовании данного метода.



■ Рис. 2. Структура показателей и этапы процесса мониторинга

■ Fig. 2. Structure of indicators and stages of the monitoring process

- Таблица 1. Веса первого уровня иерархии показателей при ОС = 0,02
- Table 1. Weights of the first level of the hierarchy of indicators for consistency relation 0.02

| Первый уровень | Шевеления плода | Физиологические показатели | Болевой синдром | Тошнота и рвота | Патологические выделения | Вес |
|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|------|
| Шевеления плода | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 0,27 |
| Физиологические показатели | 1/3 | 1 | 1/3 | 3 | 1/3 | 0,12 |
| Болевой синдром | 1 | 3 | 1 | 5 | 1 | 0,29 |
| Тошнота и рвота | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1 | 1/3 | 0,06 |
| Патологические выделения | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 0,26 |

Алгоритм расчета весовых коэффициентов с использованием метода анализа иерархий:

1. Формирование иерархии целей, вершиной которой является цель, которую необходимо достичь, или суть проблемы. На последующих уровнях представлены критерии, непосредственно влияющие на достижение цели.
2. Парное сравнение критериев по важности, для которого используется шкала относительной важности критериев.

3. Расчет локальных векторов приоритетов — уже можно сделать вывод о том, какой из критериев является наиболее значимым.

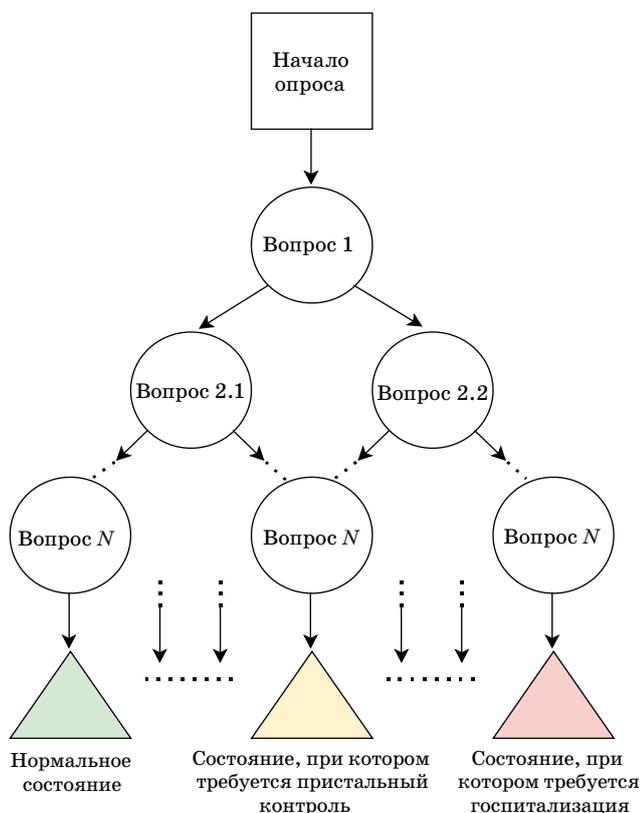
4. Проверка согласованности локальных приоритетов, для чего рассчитывается отношение согласованности (ОС). В случае, если $ОС > 0,1$, утверждают, что суждения эксперта, на основании которых заполнялась матрица, являются рассогласованными, а значит, следует заполнить матрицу заново. Иначе суждения эксперта принимаются.

Таким образом, возможно рассчитать весовые коэффициенты каждого из критериев и оценить их влияние на исходную цель.

По описанной методике были рассчитаны веса первого уровня иерархии диагностически значимых показателей (табл. 1).

Полученные значения весовых коэффициентов используются в алгоритме интегральной оценки состояния здоровья беременной женщины.

Обобщенный алгоритм поддержки принятия решений (рис. 3) состоит из вопросов нескольких уровней. Каждый из вопросов может иметь n -е количество ответов. Исходя из полученных ответов, система будет классифицировать текущее состояние здоровья беременной как «нормальное», «состояние, при котором требуется пристальный контроль» или «состояние, при котором требуется госпитализация».



■ Рис. 3. Обобщенный алгоритм поддержки принятия решений
 ■ Fig. 3. Generalized decision support algorithm

Пример экспериментальной апробации измерительного канала аппаратно-программного комплекса

Для экспериментальной апробации был выбран измерительный канал, осуществляющий сбор данных о динамике биохимических показателей мочи. На рынке представлено множество портативных биохимических анализаторов, позволяющих проводить общий анализ мочи в домашних условиях. Для апробации и последую-

щего включения в аппаратно-программный комплекс был выбран портативный анализатор с возможностью оценки состояния здоровья пациента на основании комплекса из 11 показателей:

- 1) глюкоза (GLU);
- 2) билирубин (BIL);
- 3) относительная плотность (SG);
- 4) pH;
- 5) кетоновые тела (KET);
- 6) скрытая кровь (BLD);
- 7) белок (PRO);
- 8) уробилиноген (URO);
- 9) нитриты (NIT);
- 10) лейкоциты (LEU);
- 11) аскорбиновая кислота (VC).

Для исследования эффективности работы прибора, а также для оценки точности получаемых результатов (в сравнении с лабораторным анализом) и целесообразности включения прибора в систему удаленного мониторинга в течение месяца проводились ежедневные исследования мочи здорового человека (табл. 2).

На основании сводных данных за месяц (рис. 4) можно выявить некоторые закономерности в состоянии здоровья пациента. Например, видно, что уровни таких показателей, как уробилиноген, кетоны, глюкоза, аскорбиновая кислота и нитраты оставались близкими к нулю на протяжении всего времени исследования. В то же время наблюдается скачок таких показателей, как билирубин, скрытая кровь, белок, относительная плотность и pH мочи. Скачки наблюдаются в течение пяти дней, что соответствует периоду критических дней у испытуемой. После завершения этого периода показатели возвращаются

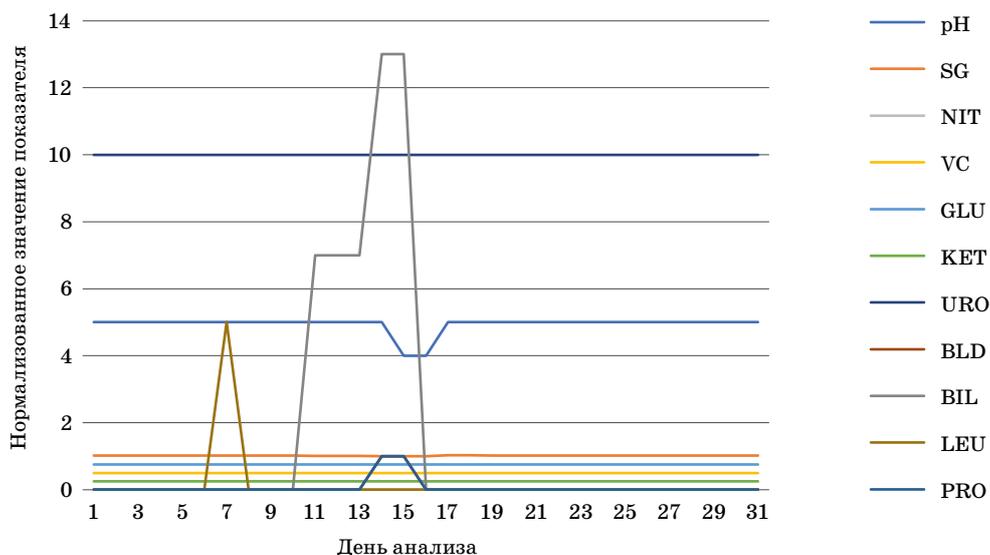
■ Таблица 2. Пример результатов анализа мочи

■ Table 2. Example of results of urine analysis

| Показатель | Значение |
|-------------------------|---------------|
| Уробилиноген | < 16 мкмоль/л |
| Скрытая кровь | Отрицательное |
| Билирубин | Отрицательное |
| Кетоны | 0 ммоль/л |
| Лейкоциты | 0 |
| Глюкоза | Отрицательное |
| Белок | Отрицательное |
| pH | 5 |
| Нитраты | Отрицательное |
| Относительная плотность | 1,020 |
| Аскорбиновая кислота | Отрицательное |

в пределы нормы до конца исследования. Также наблюдается однодневный скачок в количестве лейкоцитов, что соответствует периоду восстановления после введения испытуемой вакцины против COVID-19 днем ранее.

Для понимания степени точности отдельного исследования параллельно был проведен анализ мочи испытуемой в лабораторной службе (табл. 3).



■ Рис. 4. Изменение биохимических показателей мочи

■ Fig. 4. Changes in the biochemical parameters of urine

■ **Таблица 3.** Сравнительный анализ биохимических показателей мочи
 ■ **Table 3.** Comparative analysis of biochemical parameters of urine

| Показатель | Портативный анализатор | Лабораторный анализ |
|-------------------------|------------------------|---------------------|
| Уробилиноген | < 16 мкмоль/л | 10,7 мкмоль/л |
| Скрытая кровь | Отрицательное | Отрицательное |
| Билирубин | Отрицательное | Отрицательное |
| Кетоны | 0 ммоль/л | 0,35 ммоль/л |
| Лейкоциты | 0 | 1 |
| Глюкоза | Отрицательное | Отрицательное |
| Белок | Отрицательное | Отрицательное |
| рН | 5 | 4,9 |
| Нитраты | Отрицательное | Отрицательное |
| Относительная плотность | 1,020 | 1,012 |
| Аскорбиновая кислота | Отрицательное | Отрицательное |

Сравнение результатов, полученных с помощью портативного анализатора и стационарного анализатора в лабораторной службе, позволяет выявить различия в трех показателях: уробилиноген, лейкоциты и кетоны. Однако различия в них незначительны и не влияют на общую интерпретацию результатов анализа. Следовательно, диагностика с помощью исследуемого анализатора обеспечивает точность, сравнимую с лабораторным анализом.

Заключение

Проблема удаленного мониторинга состояния здоровья людей стала особенно актуальной в настоящее время в связи с множеством факторов, в том числе с распространением опасных

вирусных заболеваний. Особенно изменившиеся условия жизни и оказания медицинской помощи отразились на беременных женщинах, сильно увеличив уровень смертности среди последних. Результатом проведенного исследования является обобщенная структура аппаратно-программного комплекса, который позволит следить за состоянием беременной женщины удаленно, не снижая при этом качество наблюдения и оказания медицинской помощи. Проведена апробация одного из измерительных каналов аппаратно-программного комплекса и доказана его эффективность в условиях удаленного наблюдения. Результаты исследования использованы при разработке экспериментального макета аппаратно-программного комплекса для мониторинга и контроля состояния беременной женщины.

Литература

1. Wurzer D., Spielhagen P., Siegmann A., et al. Remote monitoring of COVID-19 positive high-risk patients in domestic isolation: A feasibility study. *PLOS One*, 2021, vol. 16(9), e0257095. doi:10.1371/journal.pone.0257095
2. Taiwo O., Ezugwu A. Smart healthcare support for remote patient monitoring during Covid-19 quarantine. *Informatics in Medicine Unlocked*, 2020, vol. 20, 100428. doi:10.1016/j.imu.2020.100428
3. Kakria P., Tripathi N. K., Kitipawang P. A real-time health monitoring system for remote cardiac patients

using smartphone and wearable sensors. *Int. J. Telemed. Appl.*, 2015, 373474. doi:10.1155/2015/373474

4. Kalid N., Zaidan A. A., Bahaa B., Salman O. Based real time remote health monitoring systems: A review on patients prioritization and related "Big Data" using body sensors information and communication technology. *Journal of Medical Systems*, 2017, vol. 42, iss. 2, Article 30. doi:10.1007/s10916-017-0883-4
5. Mohammed K. I., Zaidan A. A., Zaidan B. B., Albahri O. S. & Hashim M., Alsalem M. A., Albahri A. S., Hadi Ali. Real-time remote-health monitoring systems: A review on patients prioritisation for multi-

- ple-chronic diseases, taxonomy analysis, concerns and solution procedure. *Journal of Medical Systems*, 2019, vol. 43, Article 223. doi:10.1007/s10916-019-1362-x
6. **Yuldashev Z. M., Magrupov T. M.** Systems and technologies for remote health state monitoring of patients with chronic diseases. *International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)*, IEEE, 2020, pp. 1–6. doi:10.1109/ICISCT50599.2020.9351387
 7. **Ryu D., Kim D. H., Price J. T., Jong J. Y., et al.** Comprehensive pregnancy monitoring with a network of wireless, soft, and flexible sensors in high- and low-resource health settings. *PNAS*, 2021, vol. 118, no. 20, e2100466118. doi:10.1073/pnas.2100466118
 8. **Pustozarov E. A., Yuldashev Z. M., Popova P. V., Bolotko Y. A., Tkachuk A. S.** Information support system for patients with gestational diabetes mellitus. *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 51, no. 6, pp. 407–410. doi:10.1007/s10527-018-9759-2
 9. **Peterson A., Arendt K. W., Sharpe E.** Management of supraventricular tachycardia in pregnancy. *Pain Medicine*, 2020, vol. 21, iss. 2, pp. 426–428. doi:10.1093/pm/pnz330
 10. **Noben L., Westerhuis M. E. M. H., van O Laar J., Kok R. D., et al.** Feasibility of non-invasive Foetal electrocardiography in a twin pregnancy. *BMC Pregnancy and Childbirth*, 2020, vol. 20, Article 215. doi:10.1186/s12884-020-02918-8
 11. **Yuldashev Z. M., Sergeev A. M., Nastueva N. S.** Perspectives for the use of the internet of things in portable online cardiac monitors. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 55, iss. 2, pp. 201–214. doi:10.1007/s10527-021-10102-1
 12. **Luo F. Y., Chadha R., Osborne C., Kealey A.** Arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy (ARVC) in pregnancy: a case series of nine patients and review of literature. *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*, 2020. doi:10.1080/14767058.2020.1745176
 13. **Raut R., Dikshit-Ratnaparkhi A., Bormane D.** Development of algorithm for extraction of fetal from maternal ECG on benchmark. *Database and Prototype Development for Acquisition*, IEEE, 2020. doi:10.1109/ICCMC48092.2020.ICCMC-00059
 14. **Evans J., Papadopoulos A., Silvers C., Charness N., Boot W., Fairchild L., et al.** Remote health monitoring for older adults and those with heart failure: Adherence and system usability. *Telemed J E-Health*, 2016, vol. 22, iss. 6, pp. 480–488. doi:10.1089/tmj.2015.0140
 15. **Yuldashev Z., Sergeev A., Nastueva N.** IoMT technology as the basis of wearable online monitors for space distributed monitoring systems for pregnant women. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2021)*, Conference Proceedings, 2021, Article 9470556.
 16. **Iranpak S., Shahbahrami A., Shakeri H.** Remote patient monitoring and classifying using the internet of things platform combined with cloud computing. *Journal of Big Data*, 2021, vol. 8, Article 120. doi:10.1186/s40537-021-00507-w
 17. **María Luz Morales-Botello, Diego Gachet, Manuel de Buenaga, Fernando Aparicio, María J Busto, Juan Ramón Ascanio.** Chronic patient remote monitoring through the application of big data and internet of things. *Health Informatics Journal*, 2021. doi:10.1177/14604582211030956
 18. **Whittington J. R., Magann E. F.** Telemedicine in high-risk obstetrics. *Obstetrics and Gynecology Clinics of North America*, 2020, vol. 47, no. 2, pp. 249–257. doi:10.1016/j.ogc.2020.02.007
 19. **van den Heuvel J. F. M., Teunis C. J., Franx A., Crombag N. M. T. H. & Bekker M. N.** Home-based telemonitoring versus hospital admission in high risk pregnancies: a qualitative study on women's experiences. *BMC Pregnancy Childbirth*, 2020, vol. 20, no. 77. doi:10.1186/s12884-020-2779-4
 20. **Bocca B., et al.** Human biomonitoring to evaluate exposure to toxic and essential trace elements during pregnancy. Part A. Concentrations in maternal blood, urine and cord blood. *Environmental Research*, 2019, vol. 177, p. 108599. doi:10.1016/j.envres.2019.108599
 21. **Alessia Gloria, Maria Cristina Veronesi, Rita Carluccio, Salvatore Parrillo, Ippolito De Amicis, Alberto Contri.** Biochemical blood analysis along pregnancy in Martina Franca jennies. *Theriogenology*, 2018, vol. 115, pp. 84–89. doi:10.1016/j.theriogenology.2018.04.026

UDC 681.518.3; 615.47:616-072.7
doi:10.31799/1684-8853-2021-6-21-30

Hardware and software complex for remote monitoring and control of a pregnant woman's health state

I. P. Korneeva^a, Master Student, Engineer, orcid.org/0000-0002-7587-5317

K. A. Kramar^a, Master Student, orcid.org/0000-0002-0122-9005

E. A. Semenova^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-5608-3544

A. M. Sergeev^b, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-4788-9869

Z. M. Yuldashev^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-1075-3420, zmyuldashev@etu.ru

^aSaint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The problem of remote monitoring of people's health has become especially urgent nowadays due to the rapid spread of dangerous infectious and viral diseases, such as COVID-19. This period was especially difficult for pregnant women. According to Rosstat statistics, in 2020, maternal mortality in Russia increased by 24.4% compared to 2019 and reached 11.2 per 100,000 newborns. This is the worst level since 2013. In the current conditions, there is a necessity for developing remote monitoring systems which allow you to check the health status of a pregnant woman remotely using tools outside a medical institution. **Purpose:** To develop the structure and validate the choice of elements for a hardware and software complex which would perform remote monitoring outside a medical institution and assess the condition of pregnant women during their active life. **Results:** An automated questionnaire for pregnant women has been developed in accordance with the methodological recommendations of the Ministry of Health of the Russian Federation, providing a quantitative assessment of the current state of a pregnant woman in order to study the dynamics of her health. Based on the results of instrumental studies, according to 30 factors of patient's body functioning and the questionnaire data, a set of diagnostically significant indicators was developed. For each of them, a range of values was specified (norm, alarm, pathology). We have developed an experimental sample of the hardware and software complex and tested its functioning, particularly the modes of taking biomedical data by urine tests. The algorithms for processing and analysis of biomedical data have been experimentally studied in order to confirm the validity of the proposed solutions. **Practical relevance:** The results of the studies allow us to affirmatively answer the question about the possibility of remote monitoring outside a medical institution and assessing the health state of a pregnant woman in order to predict pregnancy complications, as well as to validate the choice of measuring channels for recording a complex of biomedical signals and data, and the choice of algorithms for information processing and analysis.

Keywords — instrumental methods, processing of biomedical signals and data, assessment of the current state, remote monitoring and control, condition, pregnant women.

For citation: Korneeva I. P., Kramar K. A., Semenova E. A., Sergeev A. M., Yuldashev Z. M. Hardware and software complex for remote monitoring and control of a pregnant woman's health state. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 21–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-21-30

References

1. Wurzer D., Spielhagen P., Siegmann A., et al. Remote monitoring of COVID-19 positive high-risk patients in domestic isolation: A feasibility study. *PLoS One*, 2021, vol. 16(9), e0257095. doi:10.1371/journal.pone.0257095
2. Taiwo O., Ezugwu A. Smart healthcare support for remote patient monitoring during Covid-19 quarantine. *Informatics in Medicine Unlocked*, 2020, vol. 20, 100428. doi:10.1016/j.imu.2020.100428
3. Kakria P., Tripathi N. K., Kitipawang P. A real-time health monitoring system for remote cardiac patients using smartphone and wearable sensors. *Int. J. Telemed. Appl.*, 2015, 373474. doi:10.1155/2015/373474
4. Kalid N., Zaidan A. A., Bahaa B., Salman O. Based real time remote health monitoring systems: A review on patients prioritization and related "Big Data" using body sensors information and communication technology. *Journal of Medical Systems*, 2017, vol. 42, iss. 2, Article 30. doi:10.1007/s10916-017-0883-4
5. Mohammed K. I., Zaidan A. A., Zaidan B. B., Albahri O. S. & Hashim M., Alsalem M. A., Albahri A. S., Hadi Ali. Real-time remote-health monitoring systems: A review on patients prioritisation for multiple-chronic diseases, taxonomy analysis, concerns and solution procedure. *Journal of Medical Systems*, 2019, vol. 43, Article 223. doi:10.1007/s10916-019-1362-x
6. Yuldashev Z. M., Magrupov T. M. Systems and technologies for remote health state monitoring of patients with chronic diseases. *International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)*, IEEE, 2020, pp. 1–6. doi:10.1109/ICISCT50599.2020.9351387
7. Ryu D., Kim D. H., Price J. T., Jong J. Y., et. al. Comprehensive pregnancy monitoring with a network of wireless, soft, and flexible sensors in high- and low-resource health settings. *PNAS*, 2021, vol. 118, no. 20, e2100466118. doi:10.1073/pnas.2100466118
8. Pustozarov E. A., Yuldashev Z. M., Popova P. V., Bolotko Y. A., Tkachuk A. S. Information support system for patients with gestational diabetes mellitus. *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 51, no. 6, pp. 407–410. doi:10.1007/s10527-018-9759-2
9. Peterson A., Arendt K. W., Sharpe E. Management of supraventricular tachycardia in pregnancy. *Pain Medicine*, 2020, vol. 21, iss. 2, pp. 426–428. doi:10.1093/pm/pnz330
10. Noben L., Westerhuis M. E. M. H., van O Laar J., Kok R. D., et al. Feasibility of non-invasive Foetal electrocardiography in a twin pregnancy. *BMC Pregnancy and Childbirth*, 2020, vol. 20, Article 215. doi:10.1186/s12884-020-02918-8
11. Yuldashev Z. M., Sergeev A. M., Nastueva N. S. Perspectives for the use of the internet of things in portable online cardiac monitors. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 55, iss. 2, pp. 201–214. doi:10.1007/s10527-021-10102-1
12. Luo F. Y., Chadha R., Osborne C., Kealey A. Arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy (ARVC) in pregnancy: a case series of nine patients and review of literature. *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*, 2020. doi: 10.1080/14767058.2020.1745176
13. Raut R., Dikshit-Ratnaparkhi A., Bormane D. Development of algorithm for extraction of fetal from maternal ECG on benchmark. *Database and Prototype Development for Acquisition*, IEEE, 2020. doi:10.1109/ICCMC48092.2020.ICCMC-00059
14. Evans J., Papadopoulos A., Silvers C., Charness N., Boot W., Fairchild L., et. al. Remote health monitoring for older adults and those with heart failure: Adherence and system usability. *Telemed J E-Health*, 2016, vol. 22, iss. 6, pp. 480–488. doi:10.1089/tmj.2015.0140
15. Yuldashev Z., Sergeev A., Nastueva N. IoMT technology as the basis of wearable online monitors for space distributed monitoring systems for pregnant women. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication*

- Systems (WECONF 2021)*, Conference Proceedings, 2021, Article 9470556.
16. Iranpak S., Shahbahrami A., Shakeri H. Remote patient monitoring and classifying using the internet of things platform combined with cloud computing. *Journal of Big Data*, 2021, vol. 8, Article 120. doi:10.1186/s40537-021-00507-w
 17. María Luz Morales-Botello, Diego Gachet, Manuel de Buena-ga, Fernando Aparicio, María J Busto, Juan Ramón Ascanio. Chronic patient remote monitoring through the application of big data and internet of things. *Health Informatics Journal*, 2021. doi:10.1177/14604582211030956
 18. Whittington J. R., Magann E. F. Telemedicine in high-risk obstetrics. *Obstetrics and Gynecology Clinics of North America*, 2020, vol. 47, no. 2, pp. 249–257. doi:10.1016/j.ogc.2020.02.007
 19. van den Heuvel J. F. M., Teunis C. J., Franx A., Crombag N. M. T. H. & Bekker M. N. Home-based telemonitoring versus hospital admission in high risk pregnancies: a qualitative study on women's experiences. *BMC Pregnancy Childbirth*, 2020, vol. 20, no. 77. doi:10.1186/s12884-020-2779-4
 20. Bocca B., et al. Human biomonitoring to evaluate exposure to toxic and essential trace elements during pregnancy. Part A. Concentrations in maternal blood, urine and cord blood. *Environmental Research*, 2019, vol. 177, p. 108599. doi:10.1016/j.envres.2019.108599
 21. Alessia Gloria, Maria Cristina Veronesi, Rita Carluccio, Salvatore Parrillo, Ippolito De Amicis, Alberto Contri. Biochemical blood analysis along pregnancy in Martina Franca jennies. *Theriogenology*, 2018, vol. 115, pp. 84–89. doi:10.1016/j.theriogenology.2018.04.026

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12-ти языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>

Прогноз динамики пандемии COVID-19 по России на основе простых математических моделей эпидемий

Д. А. Томчин^а, канд. техн. наук, orcid.org/0000-0002-4223-373X, dtomchin@yandex.ru

М. С. Ситчихина^б, студент, orcid.org/0000-0003-0798-7541

М. С. Ананьевский^{б,а}, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-2355-9184

Т. А. Свенцицкая^в, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-1931-5825

А. Л. Фрадков^{а,б}, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-5633-0944

^аИнститут проблем машиноведения РАН, Большой пр. В. О., 61, Санкт-Петербург, 191778, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034, РФ

^вВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

Постановка проблемы: пандемия нового коронавируса COVID-19, начавшаяся в 2020 г. и унесшая уже более пяти миллионов жизней, стала угрозой самому существованию человечества. Поэтому прогнозирование распространения COVID-19 в каждой отдельной стране является весьма актуальной задачей. Сложность ее решения обусловливается требованием быстрой обработки больших объемов данных и тем, что данные в большинстве своем неточны и не обладают статистическими свойствами, необходимыми для успешного применения статистических методов. Необходимо разработать простые методики прогнозирования на основе классических простых моделей эпидемиологии, слабо чувствительных к неточности данных. Важно также продемонстрировать работоспособность подхода применительно к данным о заболеваемости в России. **Цель:** получение прогнозных данных на основе классических простых моделей эпидемий – SIR и SEIR. **Методы:** для дискретных версий моделей SIR и SEIR предлагается оценивать параметры моделей с использованием редуцированной версии метода наименьших квадратов и применять сценарный подход к прогнозированию. Простота и небольшое число параметров являются преимуществами моделей SIR и SEIR, весьма существенными в условиях недостатка численных исходных данных и структурной неполноты моделей. **Результаты:** построен прогноз распространения COVID-19 в России на основе опубликованных данных по заболеваемости с 10 марта по 20 апреля 2020 г., а затем выборочно, по данным октября 2020 г. и данным октября 2021 г. Приводятся результаты сравнения прогноза по моделям SIR и SEIR. Тем же методом построены и представлены прогнозы на основе данных по заболеваемости осенью 2020 г. и осенью 2021 г. для России и для Санкт-Петербурга. Для задания параметров моделей, которые затруднительно определить из официальных данных, используется сценарный подход: анализируется динамика эпидемии при нескольких возможных значениях параметров. **Практическая значимость:** полученные результаты показывают, что предложенная методика хорошо предсказывает время наступления пика заболеваемости, несмотря на неточность исходных данных.

Ключевые слова – прогнозирование эпидемий, COVID-19, SIR, SEIR.

Для цитирования: Томчин Д. А., Ситчихина М. С., Ананьевский М. С., Свенцицкая Т. А., Фрадков А. Л. Прогноз динамики пандемии COVID-19 по России на основе простых математических моделей эпидемий. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 6, с. 31–41. doi:10.31799/1684-8853-2021-6-31-41

For citation: Tomchin D. A., Sitchikhina M. S., Ananievsky M. S., Svetsitskaya T. A., Fradkov A. L. Prediction of COVID-19 pandemic dynamics in Russia based on simple mathematical models of epidemics. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 31–41 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-31-41

Введение

В 2020 г. человечество столкнулось с невиданной ранее угрозой: пандемией нового коронавируса COVID-19. Системы здравоохранения целого ряда развитых стран с трудом справляются с большим количеством тяжелобольных. Пандемия получила и продолжает собирать многочисленные жертвы. Ученые проводят обширные исследования, связанные с пандемией. На 1 ноября 2021 г. объем публикаций в базе данных «Скопус», у которых в заголовке есть термин «COVID-19», превысил 152 тысячи! Интерес специалистов в различных областях, равно как и

широкой публики, вызывает вопрос: как долго и насколько тяжело будет поражено человечество коронавирусной инфекцией. В сложной, труднопрогнозируемой ситуации может оказаться важной роль исследований с использованием математических моделей эпидемий. Основные модели в этой области известны уже более столетия и до сих пор привлекают внимание специалистов.

В настоящей работе для прогнозирования распространения COVID-19 в России применяются классические математические модели эпидемий SIR и SEIR. Несмотря на простоту, они часто используются в эпидемиологии, в том числе для анализа текущей эпидемии коронавируса

COVID-19 [1–4]. В некоторых работах говорится о преимуществах более простой модели SIR перед более сложной моделью SEIR [5]. Простота и небольшое число параметров являются преимуществами моделей SIR и SEIR, весьма существенными в условиях недостатка и недостоверности численных исходных данных и структурной неполноты моделей. Модели SIR и SEIR применялись для прогнозирования распространения COVID-19 в Китае, Франции, Италии, Германии, Португалии и ряде других стран [1–5]. Некоторые результаты по прогнозированию распространения COVID-19 в России в целом приводятся в работах [2, 6–10].

В предлагаемой работе представлен прогноз распространения COVID-19 в России по официальным статистическим данным о суточной заболеваемости и проведено сравнение результатов прогноза по моделям SIR и SEIR. Для задания параметров моделей, которые затруднительно определить из официальных данных, используется сценарный подход: анализируется динамика эпидемии при нескольких возможных значениях параметров. При выборе некоторых параметров модели SEIR используются результаты статьи [2]. Предварительные результаты были представлены авторами в работе [11], здесь эти результаты уточняются и строятся новые прогнозы по данным заболеваемости осенью 2020 г. и осенью 2021 г.

Прогнозирование на основе модели SIR

В классической SIR-модели Кермака — Маккендрика [12] рассматривается три группы индивидов: восприимчивые к заболеванию (Susceptible), инфицированные (Infected) и переболевшие/умершие (Recovered/Removed). Передача инфекции осуществляется от инфицированных индивидов к восприимчивым. Считается, что переболевшие индивиды приобретают иммунитет и не могут быть заражены вторично. Модель описывается дифференциальными уравнениями

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\beta}{N}S(t)I(t); \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\beta}{N}S(t)I(t) - \gamma I(t); \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$ — число восприимчивых, инфицированных и переболевших соответственно. Положительные величины β , γ интерпретируются как параметры, значения которых определяются

скоростью инфицирования и выздоровления соответственно. Подробнее о свойствах SIR-модели см. [13, 14].

Для применения модели к конкретной ситуации необходимо провести ее калибровку — определение значений параметров и начальных условий из экспериментальных данных. Будем использовать официальные данные Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), представленные в удобной форме на сайте Worldometers [15]. Поскольку данные ВОЗ обновляются один раз в день, удобно перейти от дифференциальной модели (1) к дискретной:

$$\begin{cases} S(t+1) - S(t) = -\frac{\beta}{N}S(t)I(t); \\ R(t+1) - R(t) = \gamma I(t), \quad t = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (2)$$

Используем для калибровки данные [15] за период с 10 марта по 20 апреля 2020 г. Начальные условия равны значениям переменных 10 марта 2020 г.

Для оценки параметров используем метод наименьших квадратов (МНК). Удобно применить его в два этапа: сначала оценить γ по формуле

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{t=1}^T (R(t+1) - R(t))I(t)}{\sum_{t=1}^T I(t)^2},$$

а затем оценить β по формуле

$$\hat{\beta} = N \frac{\sum_{t=1}^T (I(t+1) - I(t) + \hat{\gamma}I(t))S(t)I(t)}{\sum_{t=1}^T (S(t)I(t))^2}.$$

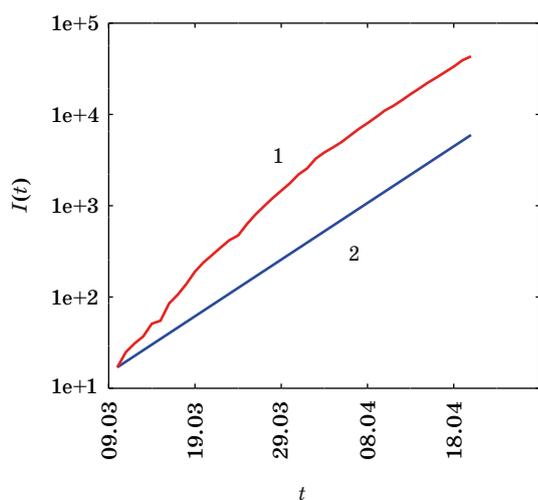
Через N обозначим начальное число восприимчивых, совпадающее с численностью населения Российской Федерации: $N = 146,745$ млн. Расчет дает следующие значения параметров: $\beta = 0,175$, $\hat{\gamma} = 0,0164$.

Результаты калибровки модели приведены на рис. 1. На первый взгляд ошибка кажется большой, но надо принимать во внимание, что модель должна в первую очередь учитывать не общее число инфицированных, а скорость роста. Тем не менее можно попытаться уточнить оценки. Из графиков видно, что точность аппроксимации снижается после 27 марта, поскольку снижается реальная скорость роста заболеваемости. Очевидно, это связано с введением в 20-х числах марта в РФ частичной самоизоляции. Для более точного прогнозирования с учетом самоизоляции временной отрезок наблюдений был разбит на две части: до 28 марта и с 28 марта по 20 апреля, — и параметры модели на каждом множестве оценивались отдельно. Если оценивать параметры модели отдельно по данным с 11 по 20 марта,

получим $\hat{\beta} = 0,26$, тогда как по данным с 21 марта по 15 апреля получим $\hat{\beta} = 0,175$, т. е. ту же величину, что и в первом случае. Оценки параметра γ также в обоих случаях совпадают: $\hat{\beta} = 0,0164$. Результаты калибровки модели по усеченному набору данных представлены на рис. 2.

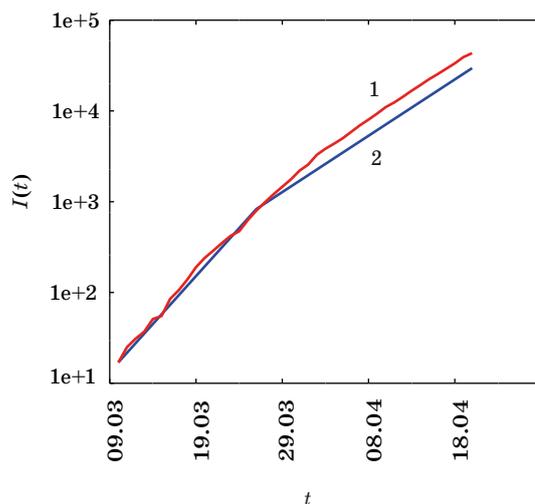
Результаты прогноза развития эпидемии на 120 дней вперед представлены на рис. 3, а и б. На рис. 3, а прогноз строится по данным с 10 марта по 20 апреля на период после 20 апреля. Из гра-

фика видно, что пик заболеваемости (выход на плато) прогнозируется примерно на 70-й день, т. е. 30 июня 2020 года. Для сравнения на рис. 3, б для прогноза на период после 28 марта используются значения параметров модели, рассчитанные по данным 10–28 марта, т. е. до введения режима самоизоляции. Из графика видно, что если бы режим самоизоляции не вводился, то пик наступил



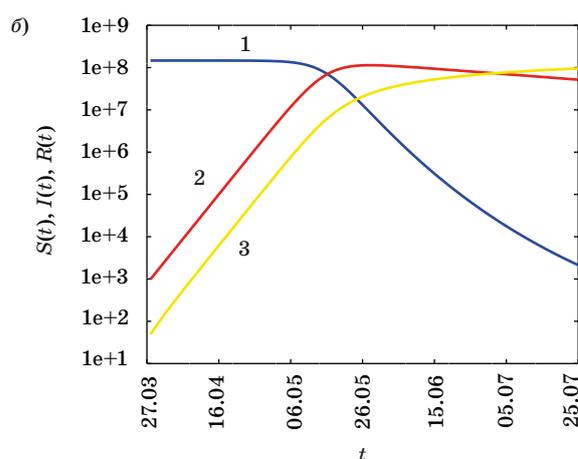
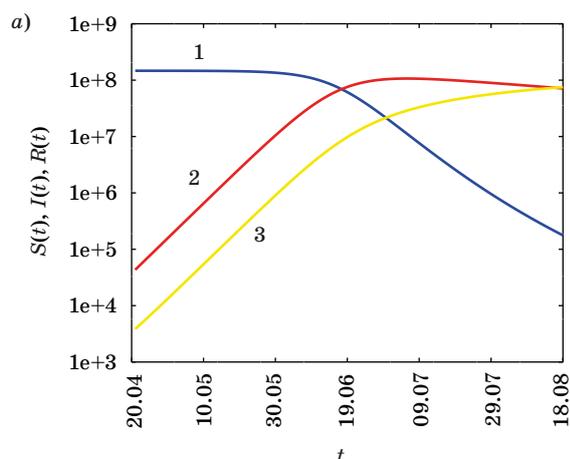
■ **Рис. 1.** Калибровка SIR-модели по данным 10 марта–20 апреля 2020 г.: 1 — реальные данные; 2 — график переменной $I(t)$ по модели

■ **Fig. 1.** Calibration of the SIR model according to the data from 10 Mar. till 20 Apr. 2020: 1 — corresponds to the real data; 2 — the graph of the variable $I(t)$ according to the model



■ **Рис. 2.** Калибровка SIR-модели отдельно по данным 10–27 марта 2020 г. и 28 марта–16 апреля 2020 г.: 1 — реальные данные; 2 — график переменной $I(t)$ по скорректированной модели

■ **Fig. 2.** Calibration of the SIR model separately according to data from 10 Mar. till 27 Mar. 2020 and from 28 Mar. till 16 Apr. 2020: 1 — corresponds to the real data; 2 — the graph of the variable $I(t)$ according to the updated model



■ **Рис. 3.** Прогноз по SIR-модели-1 на 120 дней: а — с 20.04.2020 по 18.08.2020 по данным 10 марта–20 апреля; б — с 27.03.2020 по 25.07.2020 по данным 11–20 марта: 1 — число восприимчивых $S(t)$; 2 — число инфицированных $I(t)$; 3 — число выведенных $R(t)$ (сумма числа выздоровевших и числа умерших)

■ **Fig. 3.** Forecast from SIR model-1 for 120 days: а — from 20.04.2020 till 18.08.2020 based on the data 10 Mar.–20 Apr.; б — from 27.03.2020 till 25.07.2020 based on the data 11–20 Mar.: 1 — the number of susceptible $S(t)$; 2 — the number of infected $I(t)$; 3 — the number of removed $R(t)$ (sum of the number of recovered and the number of the deceased)

бы раньше, на 60-й день, т. е. 26 мая. Полученные результаты можно использовать для оценки интенсивности карантинных мер, требуемых для заданного замедления развития вспышек эпидемий и пандемий.

Таким образом, даже простейшая SIR-модель показывает эффективность введения режима самоизоляции с точки зрения растяжения во времени фазы роста заболеваемости и позволяет дать, пусть и грубые, но полезные оценки времени роста заболеваемости. Что касается числа инфицированных, его прогноз на первый взгляд выглядит неутешительно: для того чтобы начать снижаться, это число должно приблизиться к общей численности населения страны. Однако надо учитывать, что в популяции имеется большое число бессимптомных инфицированных, которые легко переносят болезнь, зачастую даже не догадываясь о ней. Возможность количественного учета бессимптомных больных будет показана в следующем разделе с использованием модели SEIR.

Прогнозирование на основе модели SEIR

Модель SEIR (Susceptible — Exposed — Infected — Recovered) учитывает инкубационный период заболевания [13, 14]. Эта модель применялась для прогнозирования распространения COVID-19 в Китае [1] и в европейских странах [2]. Мы будем использовать модифицированную SEIR-модель с дискретным временем [2], описываемую уравнениями

$$\begin{cases} S(t+1) - S(t) = \frac{-\beta}{N}(p_c I(t) + r_t E(t))S(t); \\ E(t+1) - E(t) = -\sigma E(t) + \frac{\beta}{N}(p_c I(t) + r_t E(t))S(t); \\ I(t+1) - I(t) = \sigma E(t) - \gamma I(t); \\ R(t+1) - R(t) = \gamma I(t), \quad t = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (3)$$

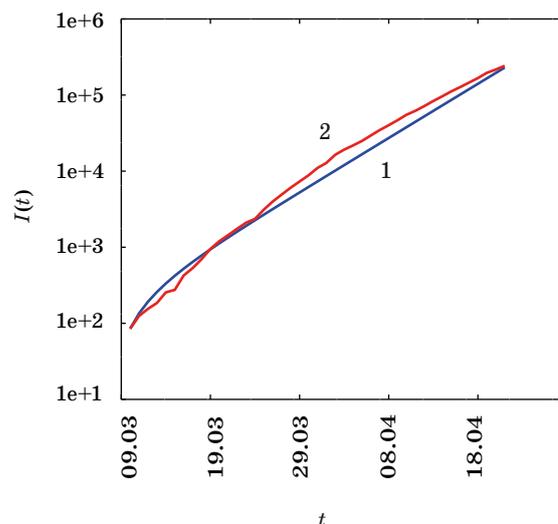
Здесь $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$ имеют тот же смысл, что и в SIR-модели (2), а $E(t)$ — численность инфицированных индивидов, находящихся в стадии инкубационного (латентного) периода. Общая численность населения $N = S(t) + E(t) + I(t) + R(t)$, как и ранее, считается постоянной.

Модель SEIR (3) имеет два параметра, значения которых можно оценить на основе реальных данных о заболеваемости: γ , β . Параметр $\gamma > 0$ представляет интенсивность смертности и выздоровления, параметр $\beta > 0$ соответствует скорости заражения вирусом восприимчивых людей во время контакта с инфицированными или латентными. Параметр $\sigma > 0$ определяет скорость инкубации, с которой появляются симптомы у индивидов, находящихся

в латентном периоде. Величину σ можно выбрать обратно пропорциональной средней длительности инкубационного периода COVID-19: $\sigma = 1/7$.

Число $p_c > 0$ соответствует числу контактов на человека в день для инфицированных $I(t)$ (предполагается, что если инфицированные люди с симптомами находятся в карантине (самоизоляции), то количество контактов уменьшается); $r_t > p_c$ — число контактов на человека в день для находящихся в латентном периоде $E(t)$. Параметры r_t , p_c можно изменять путем применения мер, регулирующих социальную дистанцию (карантин, самоизоляция). Они зависят также от плотности населения и социальных традиций.

Важной особенностью пандемии COVID-19, как и ряда предыдущих эпидемий, является существенное отличие реального числа инфицированных от документированного. Это связано с наличием значительного числа бессимптомных инфицированных, с невозможностью осуществить полное тестирование, а также с неточностью и недостаточной чувствительностью тестов. Статистические данные по Европе и США говорят о том, что доля недокументированных случаев может меняться от 40 до 90 % [16]. Обозначим через α отношение общего числа инфицированных к числу документированных инфицированных. Учитывая значительную неопределенность и трудность определения α , проведем расчеты для $\alpha = 5$ (близкие значения принимались и в исследованиях развития пандемии COVID-19 во Франции [2]) и $\alpha = 10$.



■ **Рис. 4.** Калибровка SEIR-модели при $\alpha = 5$ по данным 10 марта–20 апреля 2020 г.: 1 — число инфицированных по модели; 2 — реальные данные $I(t)$

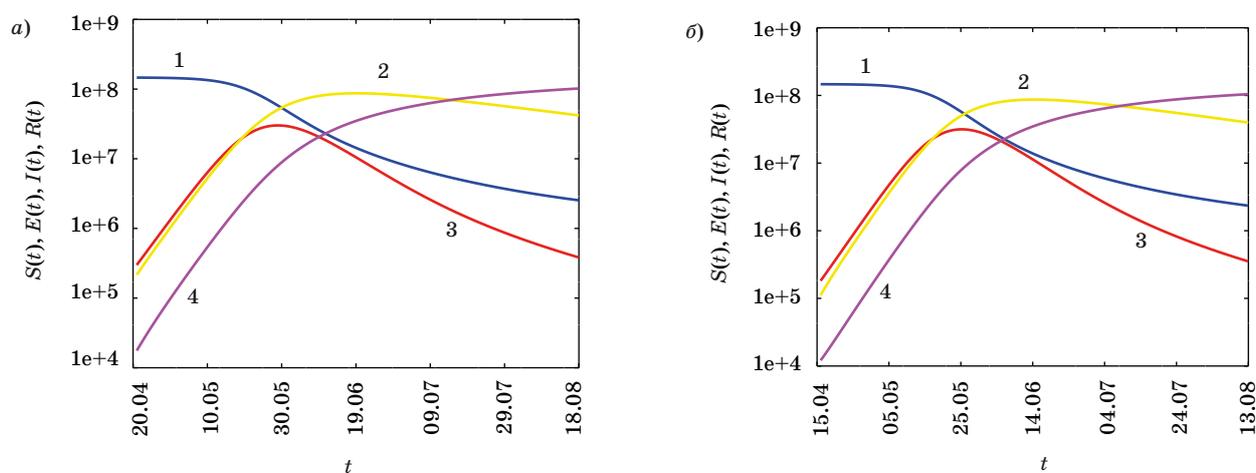
■ **Fig. 4.** Calibration of the SEIR model at $\alpha = 5$ according to data from 10 Mar. till 20 Apr. 2020: 1 — the number of infected evaluated from the model; 2 — the real data $I(t)$

Рассмотрим сначала случай $\alpha = 5$. В результате оценки параметров модели SEIR по МНК по данным с 10 марта по 20 апреля получим: $\beta = 0,027$, $\gamma = 0,017$. Следуя [2] и исходя из близости социальных традиций во Франции и в России, примем следующие значения остальных параметров в качестве базовых: $\sigma = 1/7$, $p_c = 2$, $r = 10$. Эти значения соответствуют текущему карантинному режиму (модель-1). Начальные условия $S(t)$, $I(t)$, $E(t)$, $R(t)$ при $t = 0$ также задаются аналогично [2].

Данные о числе инфицированных $I(t)$, числе выздоровевших $H(t)$ и числе умерших $D(t)$ берут-

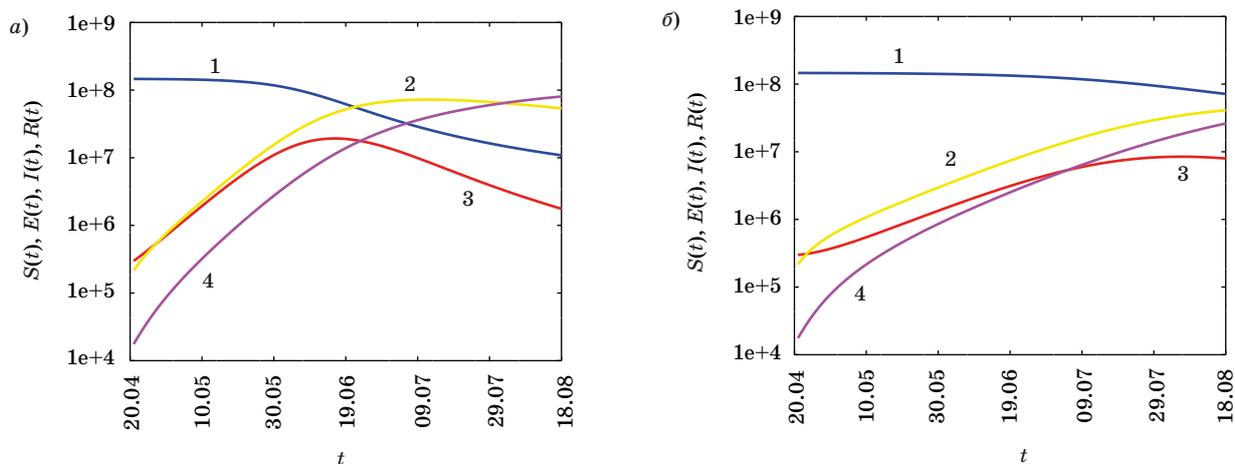
ся из официальных источников [15]. Результаты калибровки представлены на рис. 4. Они показывают хорошую точность аппроксимации реальных данных моделью. Результаты прогноза на 120 дней по модели представлены на рис. 5, а и б. Видно, что по данным с 10 марта по 20 апреля пик эпидемии прогнозируется на 40-й день — 30 мая 2020 г. (см. рис. 5, а).

Для сравнения на рис. 5, б показаны результаты прогноза по модели, построенной по данным с 10 марта по 15 апреля. Такую модель можно было построить, естественно, с использованием



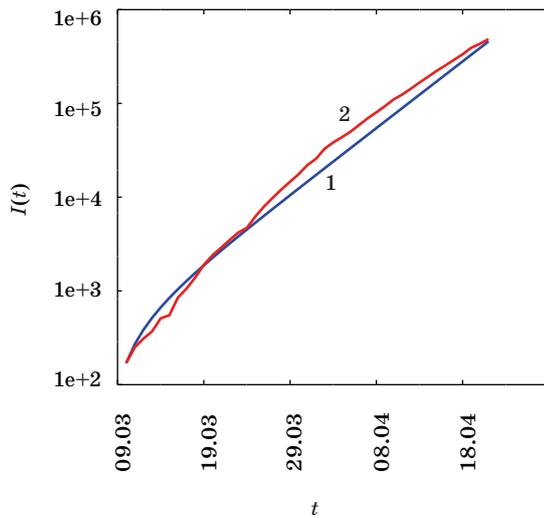
■ **Рис. 5.** Прогноз по SEIR-модели-1 на 120 дней при $\alpha = 5$: а — с 20.04.2020 по 18.08.2020 по данным 10 марта–20 апреля; б — с 15.04.2020 по 13.08.2020 по данным 10 марта–15 апреля: 1 — число восприимчивых $S(t)$; 2 — число инфицированных в инкубационном периоде $E(t)$; 3 — число инфицированных $I(t)$; 4 — число выведенных $R(t)$

■ **Fig. 5.** Forecast based on SEIR model-1 for 120 days at $\alpha = 5$: а — from 20.04.2020 till 18.08.2020 according to data from 10 Mar. till 20 Apr.; б — from 15.04.2020 till 13.08.2020 according to data from 10 Mar. till 15 Apr.: 1 — the number of susceptible $S(t)$; 2 — the number of infected in the incubation period $E(t)$; 3 — the number of infected $I(t)$; 4 — the number of removed $R(t)$



■ **Рис. 6.** Прогноз по SEIR-модели-2 (строгий карантин) (а) и по SEIR-модели-3 (очень строгий карантин) (б) при $\alpha = 5$ по данным 10 марта–20 апреля 2020 г.: 1 — число восприимчивых $S(t)$; 2 — число инфицированных в инкубационном периоде $E(t)$; 3 — число инфицированных $I(t)$; 4 — число выведенных $R(t)$

■ **Fig. 6.** Forecast based on SEIR model-2 (strict quarantine) (а) and on SEIR model-3 (very strict quarantine) (б) for $\alpha = 5$ according to data from 10 Mar. till 20 Apr. 2020: 1 — the number of susceptible $S(t)$; 2 — the number of infected in the incubation period $E(t)$; 3 — the number of infected $I(t)$; 4 — the number of removed $R(t)$



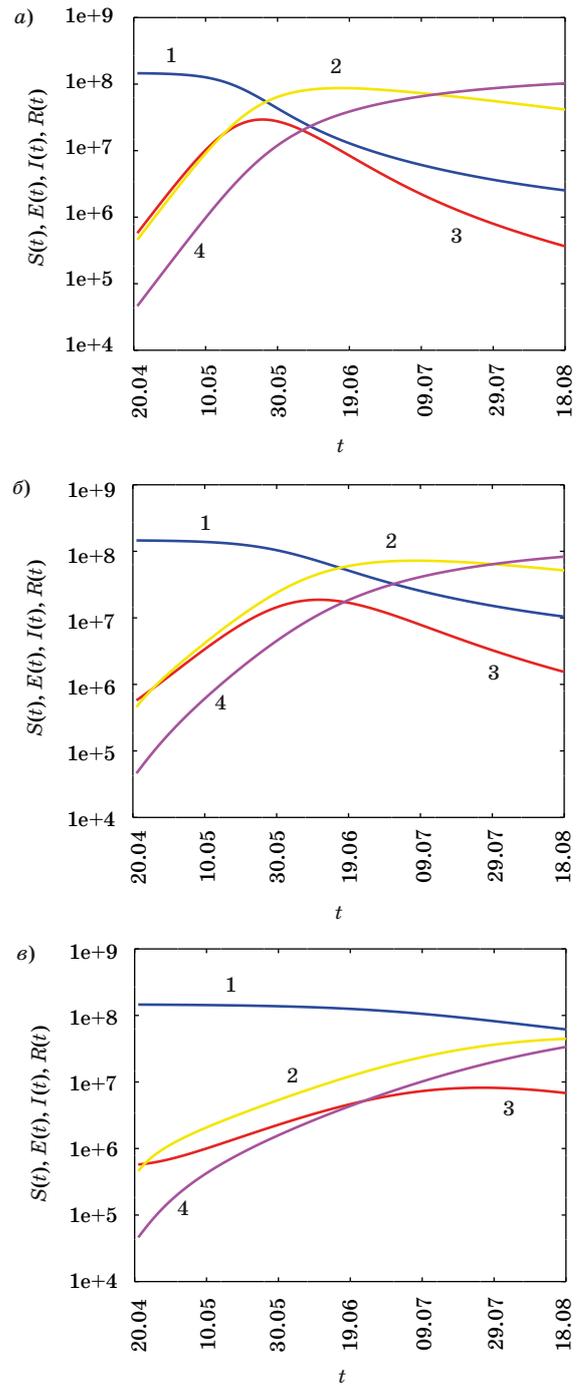
■ **Рис. 7.** Калибровка SEIR-модели при $\alpha = 10$ по данным 10 марта–20 апреля 2020 г.: 1 — число инфицированных по модели; 2 — реальные данные $I(t)$
 ■ **Fig. 7.** Calibration of the SEIR model at $\alpha = 10$ according to data from 10 Mar. till 20 Apr. 2020: 1 — the number of infected evaluated from the model; 2 — the real data $I(t)$

меньшего количества данных. Казалось бы, она должна иметь меньшую предсказательную силу. Однако на графике видно, что даже такая «устаревшая» модель прогнозирует пик заболеваемости не менее точно, на 45-й день, или также на 30 мая.

Аналогичный прогноз для усиленного карантинного режима (модель-2, $p_c = 1,5$, $r = 7,5$) представлен на рис. 6, а, а на рис. 6, б — для еще более строгого карантинного режима (модель-3, $p_c = 1$, $r = 5$).

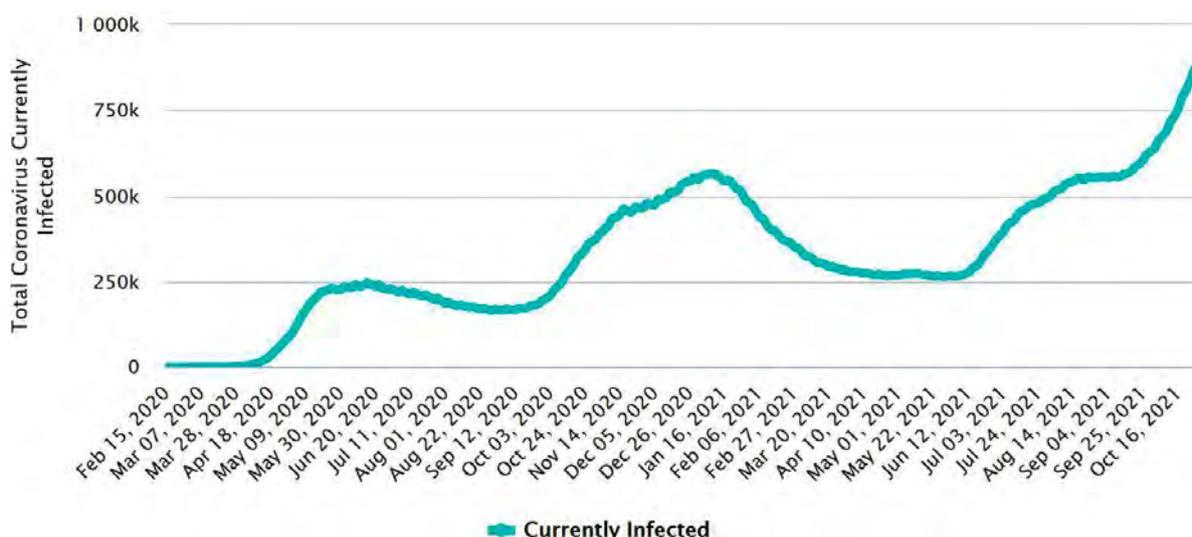
Таким образом, как видно из графиков рис. 5 и 6, при стандартном карантинном режиме пик заболеваемости наступает на 40-й день — 30 мая, при строгом режиме на 60-й день — 10 июня, а при очень строгом режиме на 100-й день — 20 июля 2020 года. Видно также, что более строгий режим приводит к снижению пика заболеваемости: при стандартном режиме число заболевших может достигать 50 млн, при строгом карантинном режиме величина пика падает до 20 млн, а при очень строгом режиме становится менее 10 млн. При этом доля документированных случаев еще в α раз меньше.

Перейдем к рассмотрению случая $\alpha = 10$. Калибровка модели проводится аналогично случаю $\alpha = 5$. Результаты калибровки представлены на рис. 7. Они также показывают хорошую точность аппроксимации реальных данных моделью везде, кроме начального участка. Результаты прогноза на 120 дней на период с 20 апреля по 18 августа 2020 г. по модели представлены на рис. 8, а. Из графиков видно, что прогнозируемые даты достижения максимального числа инфици-



■ **Рис. 8.** Прогноз по SIR-модели-1 (а), по SEIR-модели-2 (строгий карантин) (б) и по SEIR-модели-3 (очень строгий карантин) (в) при $\alpha = 10$ на 120 дней с 20.04.2020 по 18.08.2020 по данным 10 марта–20 апреля 2020 г.: 1 — число восприимчивых $S(t)$; 2 — число инфицированных в инкубационном периоде $E(t)$; 3 — число инфицированных $I(t)$; 4 — число выведенных $R(t)$

■ **Fig. 8.** Forecast based on SEIR model-1 (a), on SEIR model-2 (strict quarantine) (б) and on SEIR model-3 (very strict quarantine) (в) for $\alpha = 10$ from 20.04.2020 till 18.08.2020 based on the data 10 Mar.–20 Apr. 2020: 1 — the number of susceptible $S(t)$; 2 — the number of infected in the incubation period $E(t)$; 3 — the number of infected $I(t)$; 4 — the number of removed $R(t)$



■ **Рис. 9.** Число инфицированных в России с 15.02.2020 по 28.10.2021 (по данным ВОЗ [15])
 ■ **Fig. 9.** Number of infected in Russia from 15.02.2020 till 28.10.2021 (according to WHO data [15])

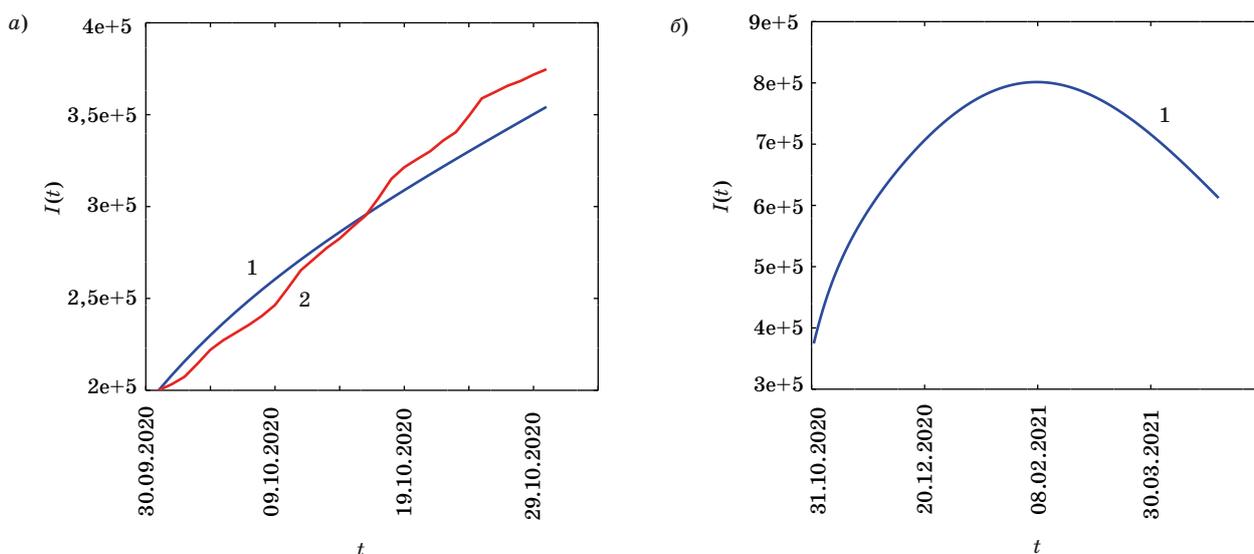
рованных приходится на 23–24 мая. На рис. 8, б представлен аналогичный прогноз для усиленного карантинного режима (модель-2, $p_c = 1,5$, $r = 7,5$), а на рис. 8, в — прогноз для очень строгого карантинного режима (модель-3, $p_c = 1$, $r = 5$). Видно, что изменение характера процессов при изменении величины α от 5 до 10 невелико.

Интересно сравнить результаты прогнозирования с фактическими данными заболеваемости. На рис. 9 показано число инфицированных по официальным данным ВОЗ [15]. Пик первой (весенней) волны пандемии 2020 г. был достигнут

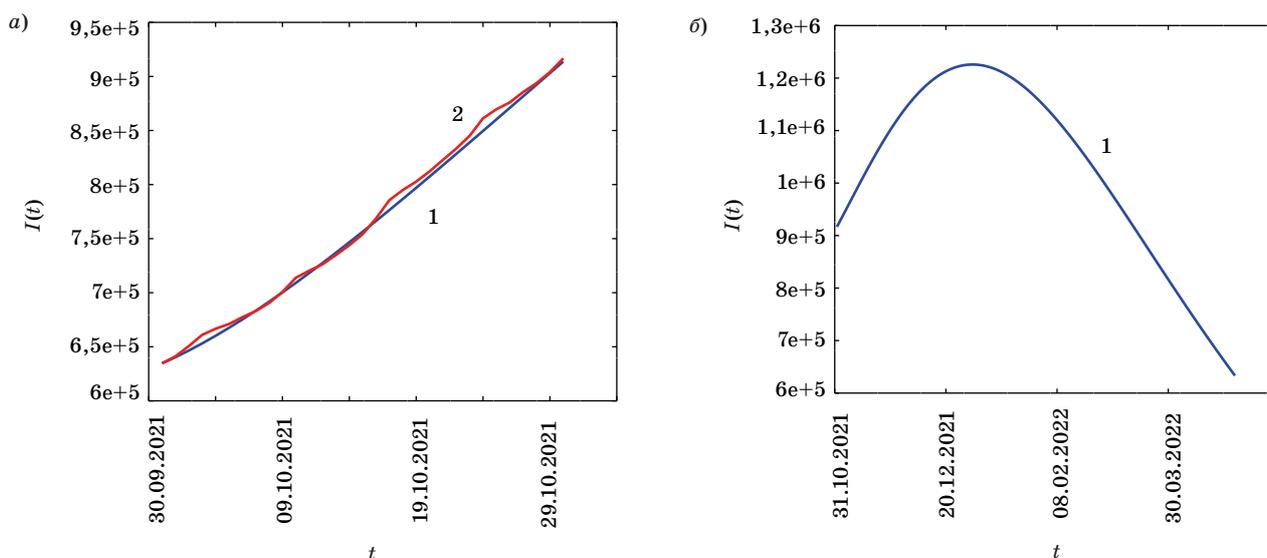
в конце июня, т. е. предложенный в работе подход дает более точный прогноз, чем прогнозы, появлявшиеся в апреле-мае 2020 г. в СМИ.

Прогноз по осенним данным 2020 и 2021 года

Представленный подход применяется далее к прогнозированию числа инфицированных COVID-19 в России по модели SEIR по осенним данным 2020 и 2021 г. Построим прогноз по дан-



■ **Рис. 10.** Калибровка (а) и прогноз (б) SEIR-модели на 240 дней по данным 1–31 октября 2020 г.: 1 — число инфицированных по модели; 2 — реальные данные $I(t)$
 ■ **Fig. 10.** Calibration (a) and forecast (б) of the SEIR model for 240 days according to data from 1 till 31 Oct. 2020: 1 — the number of infected evaluated from the model; 2 — the real data $I(t)$



■ **Рис. 11.** Калибровка (а) и прогноз (б) SEIR-модели на 240 дней по данным 1–31 октября 2021 г.: 1 — число инфицированных по модели; 2 — реальные данные $I(t)$

■ **Fig. 11.** Calibration (a) and forecast (б) of the SEIR model for 240 days according to data from 1 till 31 Oct. 2021: 1 — the number of infected evaluated from the model; 2 — the real data $I(t)$

ным за октябрь 2020 г. с параметрами модели SEIR по МНК: $\beta = 0,01$, $\gamma = 0,03$. Результаты калибровки представлены на рис. 10, а. На рис. 10, б видим заметный рост числа инфицированных, что соответствует наблюдаемой в 2020 г. ситуации. При этом пик заболеваемости по модели приходится на начало февраля 2021 г., в то время как реальный пик был отмечен в начале января 2021 г. (см. рис. 9).

Проведем аналогичные исследования на данных за октябрь 2021 г. из [15]. Оценивая параметры модели SEIR по МНК, получим $\beta = 0,018$, $\gamma = 0,02$. На рис. 11, а представлена калибровка модели, видно, что точность аппроксимации весьма высока.

Отметим, что октябрь 2020-го и октябрь 2021 г. похожи тем, что заболеваемость COVID-19 в эти периоды возрастает. Возможно, именно это обуславливает правдоподобие прогнозов.

По рис. 11, б можно сделать вывод, что число заболевших в конце 2021 г. растет.

Заключение

В статье приведены результаты расчета параметров простых математических моделей динамики пандемии коронавируса COVID-19 — классических моделей эпидемиологии SIR и SEIR. В качестве исходных данных для расчета взяты официальные данные ВОЗ по заболеваемости в России с 10 марта по 20 апреля 2020 г., а также за октябрь 2020 и 2021 гг. Получены вари-

анты прогноза числа инфицированных на 120 и 240 дней при изменении параметра социальной дистанции, характеризующего различные режимы строгости карантинных ограничительных мер, и параметра α , определяющего долю недокументированных случаев инфицирования.

Сравнение результатов прогноза с реальными данными показывает, что простые модели SIR и SEIR работоспособны в условиях ограниченного объема и недостаточной достоверности данных и дают возможность прогнозировать процессы распространения вируса не только качественно, но и количественно. Результаты прогноза могут использоваться для оценки эффективности ограничительных мер, для выбора оптимальной стратегии, например путем периодического усиления и ослабления карантинных мер [17], и т. д.

Расчет по данным за октябрь 2021 г. показал, что пик числа инфицированных в России зимой 2021/2022 года следует ожидать не ранее января 2022 года. На момент написания статьи судить о достоверности данного прогноза невозможно.

Следует заметить, что исследование проводилось при ряде дополнительных предположений: считалось, что все население страны восприимчиво к вирусу, что вирус не обладает сезонностью и т. п. При таких предпосылках итоговым сценарием является то, что в конечном итоге переболеет значительная часть населения, а от принимаемых мер зависит только темп распространения болезни. В реальности же распространение инфекции может быть ограничено какими-то факторами, которые в настоящий момент неизвест-

ны и здесь не учитывались. С другой стороны, на динамику могут влиять и другие разнонаправленные факторы, такие как повторное заражение, мутации вируса и т. д. При этом наиболее правдоподобным оказывается пессимистический сценарий, чему способствует недостаточная информированность не только населения и властей, но и специалистов о ходе развития пандемии. При этом пессимизм прогнозов специалистов [18] усугубляется объективными данными о низкой культуре соблюдения профилактических мер населением.

За прошедшее с начала пандемии время арсенал математических моделей, предлагаемых специалистами, значительно расширился. Используются регрессионные модели [6], модели с применением машинного обучения [9, 19], модели более высоких порядков [20] и др. Казалось

бы, учет дополнительных факторов, в том числе региональной специфики, должен приводить к повышению точности прогнозов. Однако, по мнению авторов, увеличение сложности модели оправдано лишь при повышении достоверности исходных данных для расчета.

Тем не менее в дальнейших исследованиях целесообразно учесть дополнительные факторы: пространственные неоднородности (сетевую структуру) моделей, неполную восприимчивость населения к инфекции и эффекты повторного заражения, а в исследованиях на основе данных 2021 г. и более поздних следует учесть влияние степени вакцинации населения.

Боле того, на основе модели можно планировать режим вакцинации и использовать математические методы для создания щадящих колебательных режимов вакцинации [21, 22].

Литература

1. Yang Z., Zeng Z., Wang K., Wong S.-S., Liang W., Zanin M., Liu P., Cao X., Gao Z., Mai Z., Liang J., Liu X., Li S., Li Y., Ye F., Guan W., Yang Y., Li F., Luo S., Xie Y., Liu B., Wang Z., Zhang S., Wang Y., Zhong N., He J. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions. *Journal of Thoracic Disease*, 2020, vol. 12, no. 3. doi:10.21037/jtd.2020.02.64
2. Efimov D., Ushirobira R. On an interval prediction of COVID-19 development based on a SEIR epidemic model. *Annual Reviews in Control*, 2021, vol. 51, pp. 477–487. doi:10.1016/j.arcontrol.2021.01.006
3. Zhong L., Mu L., Li J., Wang J., Yin Z., Liu D. Early prediction of the 2019 novel coronavirus outbreak in the mainland China based on simple mathematical model. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 51761–51769. doi:10.1109/ACCESS.2020.2979599
4. Teles P. A time-dependent SEIR model to analyse the evolution of the SARS-CoV-2 epidemic outbreak in Portugal. *arXiv:2004.04735*. <https://arxiv.org/abs/2004.04735> (дата обращения: 02.08.2021).
5. Roda W. C., Varughese M. B., Han D., Li M. Y. Why is it difficult to accurately predict the COVID-19 epidemic? *Infectious Disease Modelling*, 2020, no. 5, pp. 271–281. doi:10.1016/j.idm.2020.03.001
6. Попков Ю. С., Дубнов Ю. А., Попков А. Ю. Прогнозирование развития эпидемии COVID-19 в странах Европейского союза с использованием энтропийно-рандомизированного подхода. *Информатика и автоматизация*, 2021, т. 20, № 5, с. 1010–1033. doi:10.15622/20.5.1
7. Захаров В. В., Балыкина Ю. Е. Балансовая модель эпидемии COVID-19 на основе процентного прироста. *Информатика и автоматизация*, 2021, т. 20, № 5, с. 1034–1064. doi:10.15622/20.5.2
8. Aronov I. Z., Maksimova O. V., Galkina N. M. COVID-19 highest incidence forecast in Russia based on regression model. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 2020, vol. 5, no. 5, pp. 812–819. doi:10.33889/IJMEMS.2020.5.5.063
9. Wang P., Zheng X., Ai G., Liu D., Zhu B. Time series prediction for the epidemic trends of COVID-19 using the improved LSTM deep learning method: Case studies in Russia, Peru and Iran. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2020, vol. 140, no. 110214. doi:10.1016/j.chaos.2020.110214
10. Кольцова Э. М., Куркина Е. С., Васецкий А. М. Математическое моделирование распространения эпидемии коронавируса COVID-19 в ряде европейских, азиатских стран, Израиле и России. *Проблемы экономики и юридической практики*, 2020, т. 16, № 2, с. 154–165.
11. Tomchin D. A., Fradkov A. L. Prediction of the COVID-19 spread in Russia based on SIR and SEIR models of epidemics. *OnLine*, 2020, vol. 53, no. 5, pp. 833–838. doi:10.1016/j.ifacol.2021.04.209
12. Kermack W. O., McKendrick A. G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A*, 1927, no. 115, pp. 700–721.
13. Братусь А. С., Новожилов А. С., Платонов А. П. *Динамические системы и модели биологии*. М., Физматлит, 2010. 400 р.
14. Wang Z., Bauch C. T., Bhattacharyya S., d'Onofrio A., Manfredi P., Perc M., Perra N., Salathé M., Zhao D. Statistical physics of vaccination. *Physics Reports*, 2016, vol. 664, pp. 1–113. doi:10.1016/j.physrep.2016.10.006
15. *Worldometers*. <https://www.worldometers.info/coronavirus/country/russia/> (дата обращения: 02.08.2021).
16. Li R., Pei S., Chen B., Song Y., Zhang T., Yang W., Shaman J. Substantial undocumented infection fa-

- ilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2). *Science*, 2020, vol. 368, с. 489–493. doi:10.1126/science.abb3221
17. Eubank S., Eckstrand I., Lewis D., Venkatraman S., Marathe M., Barrett C. L. Commentary on Ferguson, et al. “Impact of Nonpharmaceutical Interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand”. *Bulletin of Mathematical Biology*, 2020, vol. 82, Article 52. doi:10.1007/s11538-020-00726-x
18. Даниленко Д. М., Комиссаров А. Б., Стукова М. А., Ллюэнов Д. А. Быть или не быть: прогноз развития эпидемии COVID-19 в России. *Журнал инфектологии*, 2020, т. 12, № 3, с. 6–11. doi:10.22625/2072-6732-2020-12-3-6-11
19. Al-qaness M. A. A., Saba A. I., Elsheikh A. H., Elaziz M. A., Ibrahim R. A., Lu S., Hemedan A. A., Shanmugan S., Ewees A. A. Efficient artificial intelligence forecasting models for COVID-19 outbreak in Russia and Brazil. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 149, pp. 399–409. doi:10.1016/j.psep.2020.11.007
20. Giordano G., Blanchini F., Bruno R., Colaneri P., Di Filippo A., Di Matteo A., Colaneri M. Modelling the COVID-19 epidemic and implementation of population-wide interventions in Italy. *Nature Medicine*, 2020, vol. 26, pp. 855–860. doi:10.1038/s41591-020-0883-7
21. d’Onofrio A., Manfredi P., Poletti P. The interplay of public intervention and private choices in determining the outcome of vaccination programmes. *PLoS ONE*, 2012, vol. 7, iss. 10: e45653. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045653
22. Efimov D. V., Fradkov A. L. Oscillatory of nonlinear systems with static feedback. *SIAM J Control Optim.*, 2009, vol. 48, pp. 618–640. https://doi.org/10.1137/070706963

UDC 004.942

doi:10.31799/1684-8853-2021-6-31-41

Prediction of COVID-19 pandemic dynamics in Russia based on simple mathematical models of epidemics

D. A. Tomchin^a, PhD, Tech., orcid.org/0000-0002-4223-373X, dtomchin@yandex.ru

M. S. Sitchikhina^b, Student, orcid.org/0000-0003-0798-7541

M. S. Ananievsky^{b,a}, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-2355-9184

T. A. Svetsitskaya^c, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-1931-5825

A. L. Fradkov^{a,b}, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-5633-0944

^aInstitute of Mechanical Engineering Problems of the RAS, 61, Bol’shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bSaint-Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Emb., 199034, Saint-Petersburg, Russian Federation

^cA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaya Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction. The COVID-19 pandemic which began in 2020 and has taken more than five million lives has become a threat to the very existence of mankind. Therefore, predicting the spread of COVID-19 in each individual country is a very urgent task. The complexity of its solution is due to the requirement for fast processing of large amounts of data and the fact that the data are mostly inaccurate and do not have the statistical properties necessary for the successful application of statistical methods. Therefore, it seems important to develop simple forecasting methods based on classical simple models of epidemiology which are only weakly sensitive to data inaccuracies. It is also important to demonstrate the feasibility of the approach in relation to the incidence data in Russia. **Purpose:** Obtaining forecast data based on classical simple models of epidemics, namely SIR and SEIR. **Methods:** For discrete versions of SIR and SEIR models, it is proposed to estimate the parameters of the models using a reduced version of the least squares method, and apply a scenario approach to the forecasting. The simplicity and a small number of parameters are the advantages of SIR and SEIR models, which is very important in the context of a lack of numerical input data and structural incompleteness of the models. **Results:** A forecast of the spread of COVID-19 in Russia has been built based on published data on the incidence from March 10 to April 20, 2020, and then, selectively, according to October 2020 data and October 2021 data. The results of the comparison between SIR and SEIR forecasts are presented. The same method was used to construct and present forecasts based on morbidity data in the fall of 2020 and in the fall of 2021 for Russia and for St. Petersburg. To set the parameters of the models which are difficult to determine from the official data, a scenario approach is used: the dynamics of the epidemic is analyzed for several possible values of the parameters. **Practical relevance:** The results obtained show that the proposed method predicts well the time of the onset of the peak incidence, despite the inaccuracy of the initial data.

Keywords — forecasting epidemics, COVID-19, SIR, SEIR.

For citation: Tomchin D. A., Sitchikhina M. S., Ananievsky M. S., Svetsitskaya T. A., Fradkov A. L. Prediction of COVID-19 pandemic dynamics in Russia based on simple mathematical models of epidemics. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 31–41 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-31-41

References

- Yang Z., Zeng Z., Wang K., Wong S.-S., Liang W., Zanin M., Liu P., Cao X., Gao Z., Mai Z., Liang J., Liu X., Li S., Li Y., Ye F., Guan W., Yang Y., Li F., Luo S., Xie Y., Liu B., Wang Z., Zhang S., Wang Y., Zhong N., He J. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions. *Journal of Thoracic Disease*, 2020, vol. 12, no. 3. doi:10.21037/jtd.2020.02.64
- Efimov D., Ushirobira R. On an interval prediction of COVID-19 development based on a SEIR epidemic model. *Annual Reviews in Control*, 2021, vol. 51, pp. 477–487. doi:10.1016/j.arcontrol.2021.01.006

3. Zhong L., Mu L., Li J., Wang J., Yin Z., Liu D. Early prediction of the 2019 novel coronavirus outbreak in the mainland China based on simple mathematical model. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 51761–51769. doi:10.1109/ACCESS.2020.2979599
4. Teles P. A time-dependent SEIR model to analyse the evolution of the SARS-CoV-2 epidemic outbreak in Portugal. *arXiv:2004.04735*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2004.04735> (accessed 2 August 2021).
5. Roda W. C., Varughese M. B., Han D., Li M. Y. Why is it difficult to accurately predict the COVID-19 epidemic? *Infectious Disease Modelling*, 2020, no. 5, pp. 271–281. doi:10.1016/j.idm.2020.03.001
6. Popkov Y., Dunnov Y., Popkov A. Forecasting development of COVID-19 epidemic in European Union using entropy-randomized approach. *Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 5, pp. 1010–1033 (In Russian). doi:10.15622/20.5.1
7. Zakharov V., Balykina Y. Balance model of COVID-19 epidemic based on percentage growth rate. *Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 5, pp. 1034–1064 (In Russian). doi:10.15622/20.5.2
8. Aronov I. Z., Maksimova O. V., Galkina N. M. COVID-19 highest incidence forecast in Russia based on regression model. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 2020, vol. 5, no. 5, pp. 812–819. doi:10.33889/IJMEMS.2020.5.5.063
9. Wang P., Zheng X., Ai G., Liu D., Zhu B. Time series prediction for the epidemic trends of COVID-19 using the improved LSTM deep learning method: Case studies in Russia, Peru and Iran. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2020, vol. 140, no. 110214. doi:10.1016/j.chaos.2020.110214
10. Koltsova E. M., Kurkina E. S., Vasetsiy A. M. Mathematical modeling of the spread of COVID-19 coronavirus epidemic in a number of european, asian countries, Israel and Russia. *Problemy ekonomiki i yuridicheskoy praktiki*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 154–165 (In Russian).
11. Tomchin D. A., Fradkov A. L. Prediction of the COVID-19 spread in Russia based on SIR and SEIR models of epidemics. *OnLine*, 2020, vol. 53, no. 5, pp. 833–838. doi:10.1016/j.ifacol.2021.04.209
12. Kermack W. O., McKendrick A. G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A*, 1927, no. 115, pp. 700–721.
13. Bratus A. S., Novozhilov A. S., Platonov A. P. *Dinamichesk- ie sistemy i modeli biologii* [Dynamical systems and models in biology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 400 p.
14. Wang Z., Bauch C. T., Bhattacharyya S., d’Onofrio A., Manfredi P., Perc M., Perra N., Salathé M., Zhao D. Statistical physics of vaccination. *Physics Reports*, 2016, vol. 664, pp. 1–113. doi:10.1016/j.physrep.2016.10.006
15. *Worldometers*. Available at: <https://www.worldometers.info/coronavirus/country/russia/> (accessed 2 August 2021).
16. Li R., Pei S., Chen B., Song Y., Zhang T., Yang W., Shaman J. Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2). *Science*, 2020, vol. 368, pp. 489–493. doi:10.1126/science.abb3221
17. Eubank S., Eckstrand L., Lewis D., Venkatramanan S., Marathe M., Barrett C. L. Commentary on Ferguson, et al. “Impact of Nonpharmaceutical Interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand”. *Bulletin of Mathematical Biology*, 2020, vol. 82, Article 52. doi:10.1007/s11538-020-00726-x
18. Danilenko D. M., Komissarov A. B., Stukova M. A., Lioznov D. A. To be or not to be: forecast of COVID-19 epidemic development in Russia. *Journal Infectology*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 6–11 (In Russian). doi:10.22625/2072-6732-2020-12-3-6-11
19. Al-qaness M. A. A., Saba A. I., Elsheikh A. H., Elaziz M. A., Ibrahim R. A., Lu S., Hemedan A. A., Shanmugan S., Ewees A. A. Efficient artificial intelligence forecasting models for COVID-19 outbreak in Russia and Brazil. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 149, pp. 399–409. doi:10.1016/j.psep.2020.11.007
20. Giordano G., Blanchini F., Bruno R., Colaneri P., Di Filippo A., Di Matteo A., Colaneri M. Modelling the COVID-19 epidemic and implementation of population-wide interventions in Italy. *Nature Medicine*, 2020, vol. 26, pp. 855–860. doi:10.1038/s41591-020-0883-7
21. d’Onofrio A., Manfredi P., Poletti P. The interplay of public intervention and private choices in determining the outcome of vaccination programmes. *PLoS ONE*, 2012, vol. 7, iss. 10: e45653. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045653>
22. Efimov D. V., Fradkov A. L. Oscillatority of nonlinear systems with static feedback. *SIAM J Control Optim.*, 2009, vol. 48, pp. 618–640. <https://doi.org/10.1137/070706963>

Обнаружение атак в сетях интернета вещей методами машинного обучения

Т. М. Татарникова^а, доктор техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-6419-0072, tm-tatarn@yandex.ru

П. Ю. Богданов^а, старший преподаватель, orcid.org/0000-0002-7533-7316

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Введение: рост объема цифровых данных, генерируемых в том числе умными устройствами интернета вещей, сделал актуальными исследования, связанные с применением методов машинного обучения для обнаружения аномалий сетевого трафика — наличия сетевых атак. **Цель исследования:** предложить единый подход к обнаружению атак на разных уровнях архитектуры сети интернета вещей, основанный на методах машинного обучения. **Результаты:** показано, что на уровне беспроводной сенсорной сети обнаружение атаки связано с выявлением аномального поведения устройства интернета вещей, при котором отклонение поведения устройства интернета вещей от его профиля может расцениваться как компрометация устройства. Построение профилей умных устройств интернета вещей осуществляется на основе статистических характеристик, таких как интенсивность и продолжительность передачи пакетов, доля ретранслированных пакетов и др. На уровне локальной или глобальной проводной сети интернета вещей происходит агрегирование данных, анализ которых также выполняется методами машинного обучения. Обученные классификаторы могут стать частью системы обнаружения сетевых атак, принимающих решение о компрометации узла «на лету». Экспериментальным путем выбраны модели классификаторов сетевых атак как на уровне беспроводной сенсорной сети, так и на уровне локальной или глобальной проводной сети. Лучшие результаты в смысле оценок полноты и точности продемонстрированы методом случайного леса для проводной локальной и (или) глобальной сети и всеми рассмотренными методами для беспроводной сенсорной сети. **Практическая значимость:** предложенные модели классификаторов могут найти применение при проектировании систем обнаружения атак в сетях интернета вещей.

Ключевые слова — сетевая атака, интернет вещей, обучающая выборка, система обнаружения атак, эффективность модели классификатора.

Для цитирования: Татарникова Т. М., Богданов П. Ю. Обнаружение атак в сетях интернета вещей методами машинного обучения. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 6, с. 42–52. doi:10.31799/1684-8853-2021-6-42-52

For citation: Tatarnikova T. M., Bogdanov P. Yu. Intrusion detection in internet of things networks based on machine learning methods. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 42–52 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-42-52

Введение

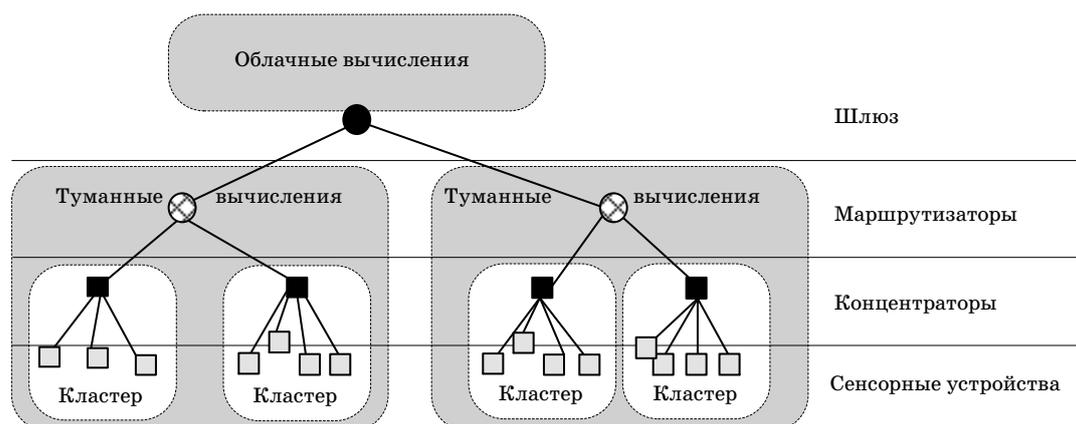
Сети интернета вещей (Internet of Things — IoT) гетерогенны, мобильны, характеризуются сложной динамической структурой [1]. Эти особенности способствуют развитию сетевых атак, направленных на маршрутизацию, таких как «червоточина», «сборный пункт», «выброс пакетов», Сивиллы, заикливания, Rush. Последствия от действий атак многоаспектны — от компрометации узлов и захвата контроля над ними до расточения энергии узлов, что приводит к быстрой деградации сети IoT [2, 3].

Защита от атак в сетях IoT реализуется системой обнаружения атак (СОА), которая при своей работе незначительно увеличивает нагрузку на маломощные узлы сети — сенсорные устройства (СУ) [4, 5].

Система обнаружения атак сети IoT имеет иерархическую структуру, как и сама сеть IoT, — три компонентных уровня (рис. 1) [6].

На уровне сенсорных устройств решается задача обнаружения аномального поведения, на-

пример резкого увеличения интенсивности и (или) продолжительности передачи, необоснованного снижения уровня остаточной энергии и т. п. Аномальное поведение может свидетельствовать о наличии атаки на IoT-устройство. Общепринятого подхода к обнаружению атак на уровне сенсорных устройств пока не существует — выбор решения зависит от многих причин: на каких устройствах построена сенсорная сеть, являются ли они энергозависимыми, каким атакам подвержены, как долго распространяется атака и пр. Тем не менее анализ источников показал частные решения, основанные на профилировании IoT-устройств. Так, в работе [7] продемонстрировано построение профилей умных устройств интернета вещей на основе статистических характеристик, таких как интенсивность и продолжительность передачи пакетов, доля ретранслированных пакетов. При этом надо учитывать, что профиль IoT-устройства одного разработчика не соответствует профилю IoT-устройства с такими же умными функциями, но другого разработчика. Собственно, в [7] это обстоятельство



■ **Рис. 1.** Иерархическая структура организации сетей IoT
 ■ **Fig. 1.** Hierarchical structure of the organization of IoT networks

косвенно демонстрируется — авторы опубликовали в открытом доступе обучающие выборки для нескольких умных дверных звонков, нескольких умных камер (<https://archive.ics.uci.edu/ml/machine-learning-databases/00442/>). В работе [8] создание профиля IoT-устройства основано на выявлении плотности функции распределения объема переданных и принятых данных.

На уровне сетей — локальных (туманные вычисления) и глобальных (облачные вычисления) — происходит агрегирование трафика, сгенерированного несколькими сотнями или даже миллионами сенсорных устройств, что в общем представляет собой обычный сетевой трафик. Поэтому на уровне сетей задача обнаружения сетевых атак может решаться известными методами, основанными на поведенческой модели сети. Принцип работы таких методов основан на обнаружении несоответствия между текущим режимом работы сети и штатным. Любое несоответствие рассматривается как атака [9, 10]. С другой стороны, поведенческая модель требует времени для фиксации атаки — узловые агенты сначала собирают (накапливают) статистики поведения и передают их в модуль принятия решения СОА. Поскольку распределенные атаки являются атаками реального времени, то для их распознавания и дальнейшего развития необходимы методы, работающие «на лету». В связи с этим при построении СОА в сетях интернета вещей популярность приобретают методы машинного обучения.

В целом объем и разнородность данных, генерируемых интернетом вещей, в настоящее время относят к BigData. Анализ BigData преимущественно выполняется методами машинного обучения [11, 12]. При наличии обученных моделей классификации на входе сетевого узла решение о нормальности/аномальности трафика может приниматься «на лету», в отличие, например, от статистических методов.

Таким образом, объектом исследования является сеть интернета вещей, построенная по иерархическому принципу — от беспроводной сенсорной сети к глобальному облаку. Цель исследования заключается в предложении единого подхода к обнаружению атак на всех уровнях сети IoT, основанного на методах машинного обучения.

Применяемые методы обучения

Для построения модели детектирования угроз на уровне сенсорной сети и в агрегированном трафике применялись следующие методы машинного обучения:

- дерево решений;
- случайный лес;
- нейронная сеть прямого распространения;
- k -ближайших соседей.

Основные параметры обученных классификаторов приведены в табл. 1.

Оценки эффективности моделей классификации

Решение о пригодности или выборе того или иного метода классификации принимается на основе оценки эффективности. При описании оценок используется матрица ошибок (рис. 2).

True positive (истинно положительное решение): результат классификации аномального трафика, предсказанный моделью, совпал с реальной меткой класса.

False Positive (ложноположительное решение): ошибка 1-го рода, модель ошибочно классифицировала нормальный объект, как аномальный.

False Negative (ложноотрицательное решение): ошибка 2-го рода, модель ошибочно классифицировала аномальный объект, как нормальный.

■ **Таблица 1.** Основные параметры методов машинного обучения
 ■ **Table 1.** Basic parameters of machine learning methods

| Метод | Основные параметры |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Дерево решений [13] | Отсечение ветвей происходит по показателю достоверности — отношению числа неправильно распознанных примеров в листе к общему числу примеров: $C_k = \frac{N_{nk}}{N_k}$, где N_{nk} — число нераспознанных примеров k -го класса; N_k — общее число примеров k -го класса Расщепление происходит по величине наименьшей информационной энтропии $H(x) = -\sum_{i=1}^N p(i) \log_2 p(i)$, где x — случайное событие с N возможными состояниями; p — вероятность, что i -й признак станет очередным узлом дерева решений Глубина дерева равна 21 |
| Случайный лес [14] | Ансамбль состоит из 10 деревьев Глубина итогового классификатора 15 Используются следующие техники построения случайного леса: — bagging — случайная выборка обучающих примеров по равномерному закону с возвратом примеров в исходное обучающее множество, что позволяет избежать переобучения — полного запоминания всех обучающих примеров; — boosting — обучение слабых деревьев решений для сборки их в сильный классификатор, при котором неверно классифицированные примеры обучения получают больший вес, а правильно классифицированные примеры теряют вес, что позволяет при дальнейшем обучении сфокусироваться на ошибочно классифицированных примерах |
| Нейронная сеть [15, 16] | Один скрытый слой. Количество скрытых слоев выбрано путем каскадного обучения при достижении минимального значения MSE Функция активации нейрона: $\phi(u_k + b_k) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(u_k + b_k))}$, где α — параметр наклона сигмоиды; u_k — взвешенная сумма; b_k — порог Веса меняются согласно локальному градиенту функции ошибки |
| k -ближайших соседей [4] | Число ближайших соседей $k = 3$ Мера близости — евклидова метрика Нормализация параметров методом минимакса: $x_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$ |

| Класс по алгоритму | Действительный класс | |
|--------------------|----------------------|---------------------|
| | + | - |
| + | True Positive (TP) | False Positive (FP) |
| - | False Negative (FN) | True Negative (TN) |

■ **Рис. 2.** Матрица ошибок [17]
 ■ **Fig. 2.** Matrix of errors [17]

True Negative (истинно отрицательное решение): модель классифицировала объект как нормальный, каким он является в действительности.

Ошибки в чистом виде не используются, поскольку показатели эффективности (качества) алгоритмов являются вероятностными — зависят от обрабатываемых событий и условий [18]. Поэтому для оценки эффективности алгоритмов обучения используются другие критерии, приведенные ниже [19].

Достоверность алгоритма классификации — accuracy:

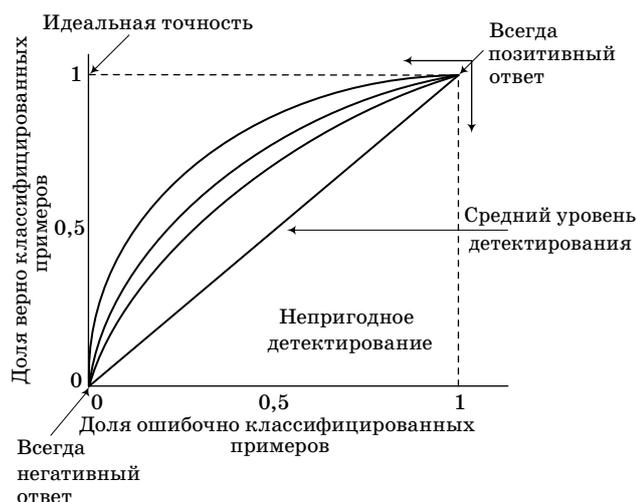
$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Достоверность показывает в процентах долю верной классификации, в нашем случае графика, что может характеризовать качество системы обнаружения атак. При такой постановке accuracy 80 % означает, что из 100 записей сетевого трафика верно детектируются 80.

Точность (precision) показывает долю объектов, действительно принадлежащих данному классу относительно всех объектов, которые алгоритм отнес к этому классу:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Доля истинно положительных решений (TPR — True Positive Rate), называемая также



■ **Рис. 3.** Примеры ROC-кривых
 ■ **Fig. 3.** Examples of ROC curves

полнотой (recall), определяется как пропорция аномальных экземпляров, классифицированных корректно, во всем множестве аномальных экземпляров, представленных в выборке:

$$TPR = Recall = \frac{TP}{TP + FN}.$$

При оценке эффективности методов глубокого обучения для задач классификации также применяется построение ROC-кривых (Receiver Operating Characteristic Curves). Абстрактно они представляют собой зависимость истинно положительных и ложноположительных решений классификатора относительно значений параметров границ диапазона, а именно их изменения (рис. 3). Площадь (area) под ROC-кривой есть количественная интерпретация качества классификатора.

F-мера (F-score) сочетает в себе оценки точности и полноты, при этом остается чувствительной к распределению данных:

$$F\text{-score} = \frac{2 \cdot recall \cdot precision}{recall + precision}.$$

Характеристика обучающей выборки

Эффективность классификаторов, построенных с применением методов машинного обучения, во многом зависит от наличия качественного в смысле отсутствия зашумленности и наличия сбалансированности классов набора обучающих примеров — dataset. Популярными наборами данных в области построения классификаторов сетевых атак для IoT-устройств являются IoT-23, STU-IoT-Malware-Capture, N_BaIoT и некоторые

другие. Все эти обучающие примеры жертвованы их создателями в виде услуги сообществу исследователей методов машинного обучения и имеются в открытом виде репозитория UCI.

Обучение классификаторов обнаружения атак на сенсорные сети выполнено на dataset N_BaIoT. Dataset содержит реальные данные трафика, собранные с девяти коммерческих IoT-устройств: дверного замка Danmini, термостата Ecobee, дверного замка Ennio, радионяни Philips_B120N10, камеры видеонаблюдения Provision PT737E, камеры видеонаблюдения Provision PT838, веб-камеры Samsung SNH1011N, камеры видеонаблюдения SimpleHome XCS71002WHT, камеры видеонаблюдения XCS71003WHT. Все устройства достоверно заражены Mirai и Bashlite.

Каждая запись набора данных представляет собой поведенческий снимок хостов и протоколов, по которым передавался пакет. Снимок получает контекст пакета путем извлечения 115 признаков, описание которых приведено в работе [7].

Наименования классов и количество примеров обучения dataset N_BaIoT приведены в табл. 2. Соотношение обучающих и тестовых примеров составило 80 и 20 % соответственно для каждого класса.

Для проводных сетей популярны следующие dataset.

KDDCup 1999 — dataset, включающий пять миллионов записей. Запись представляет собой 42 зафиксированных параметра, характеризующих пакеты, передаваемых по протоколам TCP, UDP и ICMP в определенные промежутки времени, при этом 41 параметр — это информационные признаки, а 42-й параметр — метка класса, обозначающая наименование атаки или ее отсут-

■ **Таблица 2.** Dataset N_BaIoT
 ■ **Table 2.** Dataset N_BaIoT

| Название класса | Метка класса | Количество примеров |
|-----------------|--------------|---------------------|
| benign | 0 | 98 514 |
| combo_bashlite | 1 | 18 339 |
| junk_bashlite | 2 | 9266 |
| scan_bashlite | 3 | 9052 |
| tcp_bashlite | 4 | 28 494 |
| udp_bashlite | 5 | 33 362 |
| ack_mirai | 6 | 13 307 |
| scan_mirai | 7 | 22 279 |
| syn_mirai | 8 | 14 192 |
| udpplain_mirai | 9 | 12 341 |
| udp_mirai | 10 | 36 393 |

ствии. В работе [20] приведено описание информационных признаков.

NSL-KDD 2009 — dataset, являющийся улучшением KDDCup 1999, в частности, не содержит дублирующих записей. Dataset NSL-KDD содержит 36 типов атак по четырем категориям:

1) Denial of Service (Dos) — атаки, ограничивающие доступ верифицированным пользователям к конкретному сервису через определенный протокол (Back, Land, Neptune, Pod, Smurf, Teardrop, Apache2, Udpstorm, Processtable, Worm);

2) Remote to Local (R2L) — атаки, направленные на получение доступа к локальной машине пользователя из внешней среды (Guess_Password, Ftp_write, Imap, Phf, Multihop, Warezmaster, Warezclient, Spy, Xlock, Xsnoop, Snpmguess, Snpmpgetattack, Httptunnel, Sendmail, Named);

3) User to Root (U2R) — атаки, направленные на получение привилегированных прав доступа к машине жертвы (Buffer_overflow, Loadmodule, Rootkit, Perl, Sqlattack, Xterm, Ps);

4) Probe — атаки, направленные на получение сведений об инфраструктуре пользователя (Satan, Ipsweep, Nmap, Portsweep, Mscan, Saint) [20].

В целом NSL-KDD содержит 125 973 записи, предназначенные для обучения, и 22 544 записи для тестирования.

Кроме dataset KDDCup 1999 и его улучшенной версии NSL-KDD 2009, в области информационной безопасности инфокоммуникационных сетей существует много других обучающих выборок, например: ECML-PKDD 2007 — включает контекст web-ресурса, запроса и класс атаки; HTTPSCIS 2010 — включает несколько тысяч веб-запросов, которые предлагаются для тестирования систем защиты от веб-атак; ADFA2013 — содержит трафиковые трассы системных вызовов ОС Linux нормального режима работы и трассы сетевых атак; UNSW-NB15 2015 — содержит данные трафика, записанного в течение одного часа, насчитывающего девять типов атак, сгенерированных специальным программным обеспечением, и т. д.

Из множества перечисленных обучающих примеров для обнаружения атак в проводных сетях только NSL-KDD очищен от шумов, что позволяет использовать его сразу без предобработки, к тому же имеет наибольшую практику применения. Правда, классы в NSL-KDD несбалансированные, что вынуждает отказаться от классов, представленных малыми объемами примеров обучения. В табл. 3 приведены наименования классов и количество обучающих примеров классов, которые использованы в работе. Соотношение обучающих и тестовых примеров составило 80 и 20 % соответственно для каждого класса.

■ **Таблица 3.** Dataset NSL-KDD после исключения классов малых объемов

■ **Table 3.** Dataset NSL-KDD after excluding small volume classes

| Название класса | Метка класса | Количество примеров |
|-----------------|--------------|---------------------|
| smurf | 0 | 164 091 |
| normal | 1 | 60 593 |
| neptune | 2 | 58 001 |
| snpmpgetattack | 3 | 7741 |
| mailbomb | 4 | 5000 |
| guess_passwd | 5 | 4367 |
| snpmguess | 6 | 2406 |
| satan | 7 | 1633 |
| warezmaster | 8 | 1602 |
| back | 9 | 1098 |
| Mscan | 10 | 1053 |
| apache2 | 11 | 794 |
| Processtable | 12 | 759 |
| Saint | 13 | 736 |
| Portsweep | 14 | 354 |
| Ipsweep | 15 | 306 |
| Httptunnel | 16 | 158 |

Эксперименты и оценка результатов

Значения оценок достоверности методов машинного обучения по детектированию атак в сети IoT приведены в табл. 4.

Как видно из полученных результатов обучения:

— для беспроводной сенсорной сети IoT все методы машинного обучения показали высокую точность классификации. Это свидетельствует о качественном dataset;

— для проводной сети IoT случайный лес показывает для каждого класса высокие результаты, близкие к 100 % точности. В других методах есть «провалы» в распознавании определенных классов атак, например, для дерева решений — snmpgetattack с 65,27 % точности, для нейронной сети — portsweep с 61,70 % точности, для *k*-ближайших соседей — satan с 36,91 % и saint — с 13,12 % точности.

Результаты эффективности методов машинного обучения применительно к задаче классификации сетевых атак представлены на рис. 4–7.

Результаты сравнения методов машинного обучения по оценкам precision, recall и F-score идентичны в процентном соотношении оценке precision, приведенной на рис. 4.

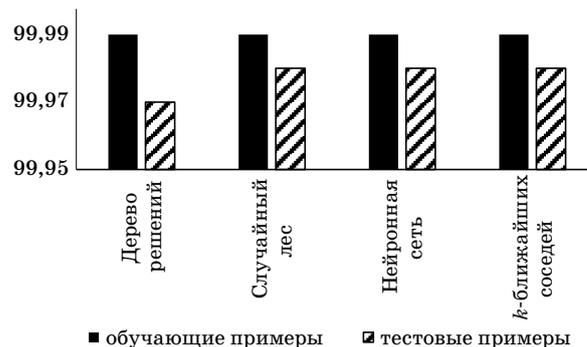
■ Таблица 4. Значения ассигуры методов машинного обучения

■ Table 4. Values of accuracy of machine learning methods

| Метка класса | Дерево решений | Случайный лес | Нейронная сеть | k -ближайших соседей |
|------------------------------------------|----------------|---------------|----------------|------------------------|
| Беспроводная сенсорная сеть IoT | | | | |
| benign | 100 | 100 | 99,98 | 100 |
| combo_bashlite | 99,98 | 99,74 | 100 | 99,99 |
| junk_bashlite | 99,88 | 99,81 | 99,92 | 99,96 |
| scan_bashlite | 99,96 | 100 | 99,92 | 99,98 |
| tcp_bashlite | 99,97 | 99,97 | 99,97 | 99,99 |
| udp_bashlite | 99,98 | 100 | 99,96 | 99,99 |
| ack_mirai | 99,97 | 99,97 | 99,97 | 99,99 |
| scan_mirai | 100 | 100 | 100 | 100 |
| syn_mirai | 100 | 100 | 100 | 100 |
| udpplain_mirai | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Проводная вычислительная сеть IoT | | | | |
| smurf | 100 | 100 | 99,5 | 100 |
| normal | 94,64 | 94,75 | 92 | 93,52 |
| neptune | 99,99 | 100 | 99,9 | 99,76 |
| snmpgetattack | 65,27 | 100 | 99,9 | 70,18 |
| mailbomb | 99,93 | 95,19 | 94,9 | 100,00 |
| guess_passwd | 99,51 | 99,93 | 97,0 | 99,22 |
| snmpguess | 99,71 | 100 | 97,9 | 100,00 |
| satan | 97,53 | 97,11 | 81,8 | 36,91 |
| warezmaster | 99,36 | 98,73 | 98,1 | 99,36 |
| back | 99,71 | 100 | 97,7 | 99,14 |
| mscan | 99,08 | 100 | 98,1 | 99,39 |
| apache2 | 100 | 100 | 99,7 | 96,34 |
| processtable | 100 | 100 | 98,4 | 100 |
| saint | 91,40 | 92,76 | 100,0 | 13,12 |
| portsweep | 100 | 100 | 61,7 | 96,19 |
| ipsweep | 100 | 100 | 79,3 | 97,78 |
| httptunnel | 100 | 100 | 100,0 | 92,73 |

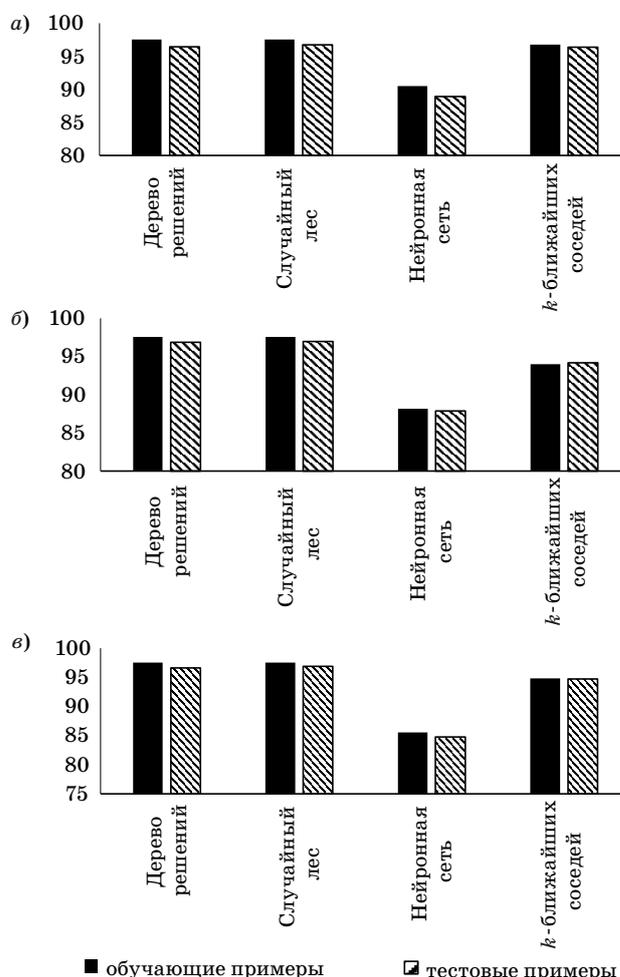
Результаты ROC-кривых для других классификаторов, обученных методами случайный лес, нейронная сеть и k -ближайших соседей для беспроводной сенсорной сети IoT, идентичны ROC-кривой, приведенной на рис. 6.

ROC-кривые для классификаторов COA на уровне проводной локальной или глобальной сети представлены на рис. 7, а-г.



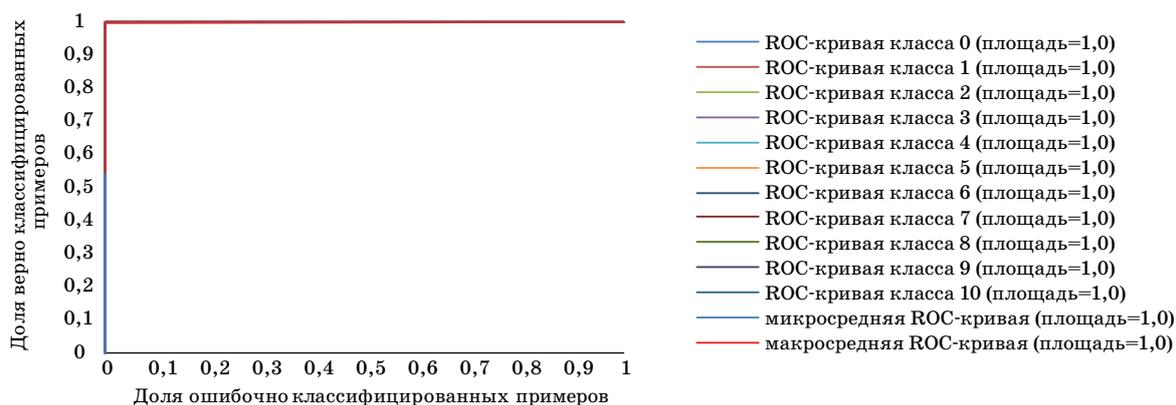
■ Рис. 4. Результаты оценки precision методов машинного обучения при классификации сетевых атак сенсорной сети

■ Fig. 4. Results of precision evaluation of machine learning methods in classifying sensor network attacks

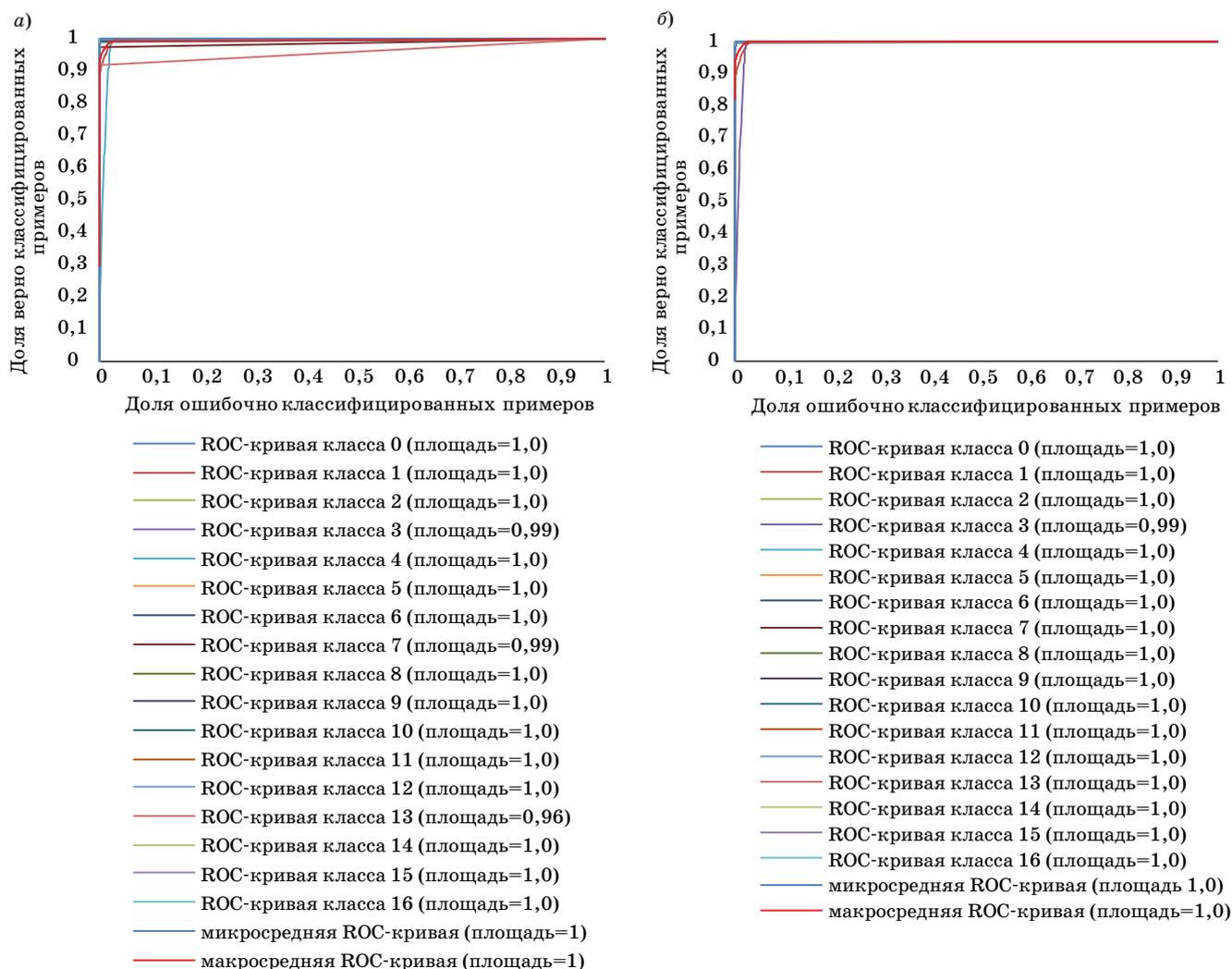


■ Рис. 5. Результаты оценки эффективности методов машинного обучения при классификации сетевых атак в проводной сети: а — precision; б — recall; в — F-score

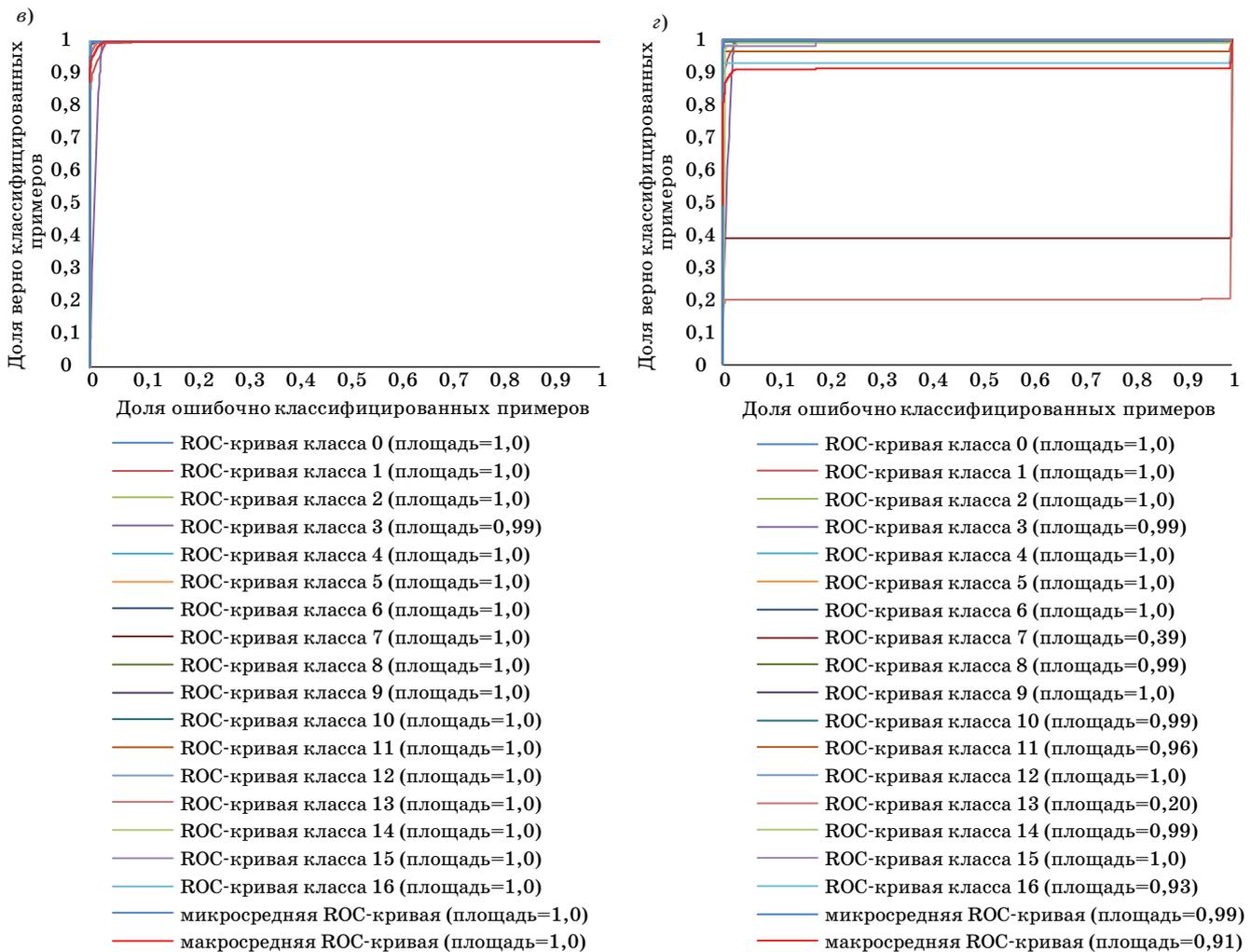
■ Fig. 5. Results of evaluating the effectiveness of machine learning methods in the classification of network attacks in a wired network: а — precision; б — recall; в — F-score



■ **Рис. 6.** ROC-кривые, полученные методом дерево решений для беспроводной сенсорной сети
 ■ **Fig. 6.** ROC-curves obtained by the method decision tree for a wireless sensor network



■ **Рис. 7.** ROC-кривые, полученные методами: дерево решений (а); случайный лес (б); нейронная сеть (в); k -ближайших соседей (г) для проводной сети IoT (см. также с. 49)
 ■ **Fig. 7.** ROC-curves obtained by the method: decision tree (a); random forest (б); neural network (в); k -nearest neighbors (г) for wired IoT network (see also p. 49)



■ Окончание рис. 7

■ Ending of Fig. 7

Приведенные на рис. 7, а-г ROC-кривые показывают высокую эффективность обученных классификаторов. Так, для методов дерево решений, случайный лес и нейронная сеть значения отношений истинно положительных и ложноположительных решений классификаторов близки к единице. Для метода *k*-ближайших соседей не могут быть достоверно обнаружены атаки *satan* и *saint*.

Содержание этапов предлагаемого подхода к обнаружению атак в сетях интернета вещей

Предлагаемый подход к обнаружению атак в сетях интернета вещей включает следующие основные этапы:

- 1) сбор статистики о передаваемом трафике;
- 2) извлечение признаков из собранной статистики;

- 3) классификация трафика;
- 4) непрерывный мониторинг сети IoT.

На этапе сбора данных осуществляется съем статистик с:

- головных узлов кластеров беспроводной сенсорной сети, принимающих данные от IoT-устройств;
- маршрутизаторов и шлюзов проводной локальной и глобальной сети;
- протоколов передачи данных.

Узловые и сетевые агенты доставляют собранные статистики в СОА.

На втором этапе из собранных статистик извлекаются признаки отдельно для классификатора беспроводной сенсорной сети и для проводной локальной и (или) глобальной сети. Признаки те же самые, что применялись для обучения классификаторов.

На третьем этапе извлеченные признаки подаются на входы соответствующих классификато-

ров. Обнаруженные аномалии в трафике, передаваемом от IoT-устройств, могут указывать на то, что устройство скомпрометировано. Признаки, указывающие на аномальное поведение какого-либо сенсорного устройства, передаются в блок принятия решений СОА, где происходит анализ признаков и принимается решение о реагировании на сложившуюся ситуацию. Атаки, обнаруженные на уровне проводной локальной или глобальной сети, также передаются в блок принятия решений СОА для выбора вариантов реагирования на выявленную атаку или класс атак.

Непрерывный мониторинг подразумевает выполнение этапов 1–3 с периодичностью, которая может совпадать, например, с продолжительностью раундов, во время которых сенсорные устройства передают данные на головной узел своего кластера беспроводной сенсорной сети.

При регистрации нового IoT-устройства трафик, генерируемый им, должен быть собран сразу после подключения IoT-устройства к сети, чтобы гарантировать, что данные являются незараженными. Таким образом формируется база данных профилей нормального поведения каждого IoT-устройства.

При появлении нового вида или класса сетевых атак рассматриваемый подход подразумевает организацию сбора статистик зараженного трафика в целях дальнейшего обучения классификатора на обнаружение этих атак. Извлеченные признаки представляют собой профиль конкретного вида или класса атаки.

Таким образом, на головных узлах кластеров беспроводной сенсорной сети функционирует модуль обнаружения аномального поведения IoT-устройств, представляющий собой обученный классификатор; на маршрутизаторах и шлюзах функционирует модуль обнаружения сетевых атак, также представляющий собой обученный классификатор.

Заключение

С ростом объемов цифровых данных в методах выявления атак стали актуальны исследования, связанные с применением методов машинного обучения для обнаружения аномалий сетевого трафика — наличия сетевых атак. Это в полной мере относится и к сетям интернета вещей, а постоянное подключение сенсорных устройств к интернету делает их удобным инструментом для организации кибератак.

На уровне беспроводной сенсорной сети обнаружение аномального поведения IoT-устройств реализуется оценкой отклонения поведения IoT-устройств от соответствующих им профилей поведения. Построение профилей умных устройств

осуществляется на основе статистических характеристик, снимаемых с узлов сети интернета вещей и протоколов, по которым передаются пакеты данных. На уровне локальной или глобальной проводной сети интернета вещей происходит агрегирование данных, анализ которых также выполняется методами машинного обучения.

Обученные модели классификации могут стать частью системы обнаружения сетевых атак, принимающих решение о компрометации узла «на лету».

Экспериментальным путем выбрана модель классификатора сетевых атак на уровне беспроводной сети и локальной или глобальной проводной сети. Лучшие результаты в смысле оценок полноты и точности продемонстрированы методом случайного леса для проводной локальной или глобальной сети и всеми рассмотренными методами для беспроводной сенсорной сети.

На качество классификаторов существенное влияние оказывает наличие сбалансированного и подготовленного набора данных, что само по себе является трудоемкой работой. В дальнейшем планируется систематизировать информационные параметры, которые могут иметь наибольшую важность при обучении классификаторов. А также выполнить сравнение двух подходов к построению СОА: основанных на методах машинного обучения и методах оценки доверия узла к своим соседям.

Литература

1. Киричек Р. В., Парамонов А. И., Прокопьев А. В., Кучерявый А. Е. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей. *Информационные технологии и телекоммуникации*, 2014, № 4 (8), с. 29–41. <http://ijitt.ru/> (дата обращения: 22.08.2021).
2. Шелухин О. И., Сакалема Д. Ж., Филинова А. С. Обнаружение вторжений в компьютерные сети. Сетевые аномалии. М., Горячая линия — Телеком, 2013. 220 с.
3. Татарникова Т. М., Богданов П. Ю., Краева Е. В. Предложения по обеспечению безопасности системы умного дома, основанные на оценке потребляемых ресурсов. *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*, 2020, № 4, с. 88–94.
4. Baddar S. A.-H., Merlo A., Megliardi M. Anomaly detection in computer networks: A state-of-the-art review. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 29–64.
5. Колбанёв М. О., Пойманова Е. Д., Татарникова Т. М. Физические ресурсы информационного процесса со-

- хранения данных. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2014, т. 57, № 9, с. 38–42.
6. Lee P. *Internet of Things for Architects*. Birmingham — Mumbai, Packt Publ., 2018. 524 p.
 7. Meidan Y., Bohadana M., Mathov Y., Mirsky Y., Breitenbacher D., Shabtai A., and Elovici Y. N-BaIoT: Network-based detection of IoT botnet attacks using deep autoencoders. *IEEE Pervasive Computing, Special Issue — Securing the IoT*, 2018, vol. 17(3), pp. 12–22.
 8. Лоднева О. Н., Ромасевич Е. П. Анализ трафика устройств интернета вещей. *Современные информационные технологии и IT-образование*, 2018, т. 14, № 1, с. 149–169. doi:10.25559/SITITO.14.201801.149-169
 9. Kumar S., Spafford E. H. A pattern matching model for misuse intrusion detection. *Proceedings of the 17th National Computer Security Conference*, 1994, pp. 11–21.
 10. Thatte G., Mitra U., Heidemann J. Parametric methods for anomaly detection in aggregate traffic. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, 2011, vol. 19(2), pp. 512–525.
 11. Викулов А. С., Парамонов А. И. Анализ трафика в сети беспроводного доступа стандарта IEEE 802.11. *Труды учебных заведений связи*, 2017, т. 3, № 3, с. 21–27.
 12. Wu S. X., Banzhaf W. The use of computational intelligence in intrusion detection systems: A review. *Applied Soft Computing*, 2010, vol. 10(1), pp. 1–35.
 13. Браницкий А. А., Котенко И. В. Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак. *Труды СПИИРАН*, 2016, вып. 2(45), с. 207–244. doi:10.15622/SP.45.13
 14. Ingre B., Yadav A., Soni A. K. Decision tree based intrusion detection system for NSL-KDD dataset. *Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems (ICTIS)*, Ahmedabad, India, March 25–26, 2017, Cham, Springer, 2017, vol. 2, pp. 207–218. doi:10.1007/978-3-319-63645-0_23
 15. Fatihand E., Aydin G. Data classification with deep learning using tensorflow. *International Conference on Computer Science and Engineering*, 2017, pp. 755–758.
 16. Татарникова Т. М. Ограничения утечки информации посредством неочевидных функций смартфона Android 5. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 5, с. 24–29. doi:10.31799/16848853-2019-5-24-29
 17. Gyanchandani M., Rana J. L., Yadav R. N. Taxonomy of anomaly based intrusion detection system: A review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2012, vol. 2(12), pp. 1–13.
 18. Татарникова Т. М., Бимбетов Ф., Богданов П. Ю. Выявление аномалий сетевого трафика методом глубокого обучения. *Известия ЛЭТИ*, 2021, № 4, с. 36–41.
 19. Jyothsna V., Prasad V. V. R. A Review of anomaly based intrusion detection systems. *International Journal of Computer Applications*, 2011, vol. 28, no. 7, pp. 26–35.
 20. *A Deeper Dive into the NSL-KDD Data Set — Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/a-deeper-dive-into-the-nsl-kdd-data-set-15c753364657> (дата обращения: 18.09.2021).

UDC 004.07

doi:10.31799/1684-8853-2021-6-42-52

Intrusion detection in internet of things networks based on machine learning methodsT. M. Tatarnikova^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-6419-0072, tm-tatarn@yandex.ruP. Yu. Bogdanov^a, Senior Lecturer, orcid.org/0000-0002-7533-7316^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The growing amount of digital data generated, among others, by smart devices of the Internet of Things makes it important to study the application of machine learning methods to the detection of network traffic anomalies, namely the presence of network attacks. **Purpose:** To propose a unified approach to detecting attacks at different levels of IoT network architecture, based on machine learning methods. **Results:** It was shown that at the wireless sensor network level, attack detection is associated with the detection of anomalous behavior of IoT devices, when the deviation of an IoT device behavior from its profile exceeds a predetermined level. Smart IoT devices are profiled on the basis of statistical characteristics, such as the intensity and duration of packet transmission, the proportion of retransmitted packets, etc. At the level of a local or global wired IoT network, data is aggregated and then analyzed using machine learning methods. Trained classifiers can become a part of a network attack detection system, making decisions about compromising a node on the fly. Models of classifiers of network attacks were experimentally selected both at the level of a wireless sensor network and at the level of a local or global wired network. The best results in terms of completeness and accuracy estimates are demonstrated by the random forest method for a wired local and/or global network and by all the considered methods for a wireless sensor network. **Practical relevance:** The proposed models of classifiers can be used for developing intrusion detection systems in IoT networks.

Keywords — network attack, Internet of Things, training sample, intrusion detection system, classifier model efficiency.

For citation: Tatarnikova T. M., Bogdanov P. Yu. Intrusion detection in internet of things networks based on machine learning methods. *Информационно-управляющие системы* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 42–52 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-42-52

References

1. Kirichek R. V., Paramonov A. I., Prokopiev A. V., Koucheryavy A. E. The investigation evolution in the wireless sensor networks area. *Telecom IT*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 29–41. Available at: <http://ijitt.ru/> (accessed 22 September 2021) (In Russian).
2. Sheluhin O. I., Sakalema D. Zh., Filinova A. S. *Obnaruzheniye vtorzheniy v kompyuternyye seti. Setevye anomalii* [Intrusion detection in computer networks. Network anomalies]. Moscow, Goriachaia liniia — Telekom Publ., 2013. 220 p. (In Russian).
3. Tatarnikova T. M., Bogdanov P. Yu., Kraeva E. V. Smart home security proposals based on assessment of consumption resources. *Problems of Information Security. Computer Systems*, 2020, no 4, pp. 88–94 (In Russian).
4. Baddar S. A.-H., Merlo A., Migliardi M. Anomaly detection in computer networks: A state-of-the-art review. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 29–64.
5. Kolbanev M. O., Poimanova E. D., Tatarnikova T. M. Physical resources of the information process of data saving. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 38–42 (In Russian).
6. Lee P. *Internet of Things for Architects*. Packt Publ., Birmingham — Mumbai, 2018. 524 p.
7. Meidan Y., Bohadana M., Mathov Y., Mirsky Y., Breitenbacher D., Shabtai A., and Elovici Y. N-BaIoT: Network-based detection of IoT botnet attacks using deep auto-encoders. *IEEE Pervasive Computing, Special Issue — Securing the IoT*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 12–22.
8. Lodneva O. N., Romasevich E. P. Analysis of devices traffic of the internet of things. *Modern Information Technologies and IT-Education*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 149–169. doi:10.25559/SITITO.14.201801.149-169 (In Russian).
9. Kumar S., Spafford E. H. A pattern matching model for misuse intrusion detection. *Proceedings of the 17th National Computer Security Conference*, 1994, pp. 11–21.
10. Thatte G., Mitra U., Heidemann J. Parametric methods for anomaly detection in aggregate traffic. *IEEE / ACM Transaction on Networking*, 2011, vol. 19(2), pp. 512–525.
11. Vikulov A., Paramonov A. IEEE 802.11 WLAN traffic analysis. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2017, vol. 3, iss. 3, pp. 21–27 (In Russian).
12. Wu S. X., Banzhaf W. The use of computational intelligence in intrusion detection systems: A review. *Applied Soft Computing*, 2010, vol. 10(1), pp. 1–35.
13. Branitskiy A. A., Kotenko I. V. Analysis and classification of methods for network attack detection. *SPIIPAS Proceedings*, 2016, iss. 2 (45), pp. 207–244. doi:10.15622/SP.45.13 (In Russian).
14. Ingre B., Yadav A., Soni A. K. Decision tree based intrusion detection system for NSL-KDD dataset. *Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology for Intelligent Systems, (ICTIS)*, Ahmedabad, India, March 25–26, 2017, Cham, Springer, 2017, vol. 2, pp. 207–218. doi:10.1007/978-3-319-63645-0_23
15. Fatihand E., Aydin G. Data classification with deep learning using tensorflow. *International Conference on Computer Science and Engineering*, 2017, pp. 755–758.
16. Tatarnikova T. M. Restricting data leakage through non-obvious features of Android 5 smartphone. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 5, pp. 24–29 (In Russian). doi:10.31799/16848853-2019-5-24-29
17. Gyanchandani M., Rana J. L., Yadav R. N. Taxonomy of anomal based intrusion detection system: A review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2012, vol. 2(12), pp. 1–13.
18. Tatarnikova T. M., Bimbetov F., Bogdanov P. Yu. Identifying network traffic anomalies by deep learning. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University Journal*, 2021, no. 4, pp. 36–41 (In Russian).
19. Jyothsna V., Prasad V. V. R. Review of anomaly based intrusion detection systems. *International Journal of Computer Applications*, 2011, vol. 28, no. 7, pp. 26–35.
20. *A Deeper Dive into the NSL-KDD Data Set — Towards Data Science*. Available at: <https://towardsdatascience.com/a-deeper-dive-into-the-nsL-kdd-data-set-15c753364657> (accessed 18 September 2021).

Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий

А. А. Батенков^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-7515-5774

К. А. Батенков^б, доктор техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-6083-1242, pustur@yandex.ru

А. Б. Фокин^б, сотрудник, orcid.org/0000-0002-2187-7325

^аОрловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Комсомольская ул., 95, Орел, 302026, РФ

^бАкадемия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Приборостроительная ул., 35, Орел, 302015, РФ

Введение: для больших и сложных по структуре телекоммуникационных сетей расчет вероятности связности оказывается весьма громоздким и трудоемким процессом вследствие огромного числа элементов в результирующем выражении. Наиболее целесообразным выходом из подобной ситуации является метод, основанный на представлении события связности сети в виде сумм произведений несовместных событий. Однако и этот метод также требует выполнения в ряде случаев дополнительных операций над множествами. **Цель:** устранить основные недостатки метода, использующего многопеременную инверсию. **Результаты:** показано, что событие связности графа следует трактовать как объединение событий связности всех его подграфов, что приводит к справедливости выражения для события связности сети в форме объединения событий связности типовых подграфов (пути, остового, а в общем случае многополюсного, дерева) исходного случайного графа. Предложена итерационная процедура приведения заданного числа событий связности к объединению независимых событий путем последовательного добавления событий несвязности подграфов. Доказана возможность устранения повторяющихся рутинных процедур, свойственных методам, использующим многопеременную инверсию, путем рассмотрения не объединения событий связности (несвязности), вырождающегося в сумму несовместных произведений, а пересечения противоположных событий, приводящего также к подобной сумме, но для получения которой нет необходимости выполнять многопеременную инверсию для каждого из слагаемых над всеми ранее проанализированными. **Практическая значимость:** полученные аналитические соотношения могут быть применены при анализе надежности, живучести или устойчивости сложноразветвленных телекоммуникационных сетей.

Ключевые слова — вероятность связности, граф, телекоммуникационная сеть, многопеременная инверсия, форма перехода к замещению.

Для цитирования: Батенков А. А., Батенков К. А., Фокин А. Б. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 6, с. 53–63. doi:10.31799/1684-8853-2021-6-53-63

For citation: Batentkov A. A., Batentkov K. A., Fokin A. B. Analysis of the probability of connectivity of a telecommunications network based on the reduction of several non-connectivity events to a union of independent events. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 53–63 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-53-63

Введение

Хорошо известно, что для больших и сложных по структуре телекоммуникационных сетей расчет вероятности связности оказывается весьма громоздким и трудоемким процессом вследствие огромного числа элементов в результирующем выражении. Например, даже задачи перечисления событий связности оцениваются вычислительной сложностью $O(v + s)$ [1] для простых цепей и $O[v + e + v(s + n)]$ [2] для остовых деревьев, где v — число вершин в эквивалентном графе; e — число ребер в эквивалентном графе; s — число событий связности (простых цепей или остовых деревьев); n — число событий несвязности.

В целом задача расчета показателей произвольной связности оказывается NP-трудной [3, 4], а значит, их точные значения вычисляются

алгоритмами экспоненциальной трудоемкости. В то же время широко известными являются точные методы факторизации Шеннона — Мура [5] и логико-вероятностные методы, использующие бинарную диаграмму решения [6]. Особняком стоят, по сути, частные случаи метода редукции — «последовательно-параллельные» [7], «многоугольник — цепь» [8] и «треугольник — звезда» [9], которые приводят к анализу графов меньшей размерности.

Существуют методы приближенной оценки вероятности связности графов, основанные чаще всего на методах статистического моделирования [10] или анализе структур графа, имеющих заданные ограничения. Подобным образом вычисляются асимптотические константы вероятности несвязности планарного взвешенного графа [11]. Асимптотика вероятности связности графов

с низконадежными ребрами использует в качестве основы количество подграфов (остовых деревьев, кратчайших путей) и позволяет отказаться от их перечисления [12, 13]. Оценка связности планарного графа с высоконадежными ребрами предполагает использование минимального числа ребер в разрезах и числа разрезов с заданным количеством ребер, а также рассмотрение двойственных графов, в которых разрезы исходного графа порождают циклы [14].

Разработаны методы, использующие разложения по остовому дереву, производительность которых при определенных условиях оказывается выше метода ветвления [15, 16]. Продолжается развитие метода факторизации, направленное на его применение для путей произвольной длины [17]. Для ограниченного класса графов, отличающихся небольшой размерностью, разработаны модификации метода факторизации, значительно увеличивающие скорость расчета [18].

В работе [19] доказана взаимосвязь всеполюсной и многополюсной связностей на основе применения решетки разбиения множества вершин неориентированного графа, а также аналитические соотношения для вероятности связности графа с использованием функции Мебиуса.

Метод кумулятивного оценивания вероятности связности графов берет свое начало еще с работ [20, 21], где описаны общие подходы к приближенному расчету. В основу данного метода могут быть положены все известные методы точного анализа: метод факторизации, логико-вероятностные методы, метод разложения по остовному дереву [22–25].

Одним из первых алгоритмов вычисления суммы событий связности является подход, изложенный в [26]. Данный алгоритм значительно сократил объем вычислений, необходимых для получения сумм произведений несовместных событий, по сравнению с более ранними подходами. Применение алфавитно-цифрового упорядочивания переменных состояния приводит к сокращению размеров непересекающихся сумм [27]. Более эффективен подход [28], в котором используется модификация правил упорядочивания списка произведений. Усовершенствована компоновка минимальных простых цепей [29, 30]. В работе [31] предложен алгоритм инверсии произведений переменных взамен применяемого ранее инвертирования отдельных переменных. Альтернативой выступает способ, предполагающий рекурсивную процедуру расчета вероятности объединенного события, изначально разработанный для анализа вероятности блокировки в сетях с вариативной маршрутизацией [32].

Таким образом, наиболее подходящим оказывается подход, основанный на представлении события связности сети в виде сумм произведений

несовместных событий [33], представляющих собой форму перехода к замещению [34–36], допускающую непосредственный переход к вероятностной функции заменой логических переменных (множеств) вероятностями, а логических операций (операций над множествами) — соответствующими арифметическими операциями [37–39]. Данное представление приводит к достаточно компактной форме записи результирующего уравнения связности и, как следствие, к снижению вычислительной сложности и уменьшению результирующей ошибки округления [40–43]. Отметим, что данный подход рекомендован отечественным ГОСТом для расчета устойчивости функционирования сетей [44] и в отечественной научной литературе получил название метода объединения с учетом эффекта поглощения [34].

Основным вкладом настоящей работы в развитие существующих методов точного расчета вероятности связности для графов произвольной структуры является введение и формализация рекурсивной процедуры, использующей операции поглощения и расщепления над событиями несвязности. Предполагается, что устранение повторяющихся процедур сравнения существенно упростит алгоритмы расчета показателей связности.

Общий подход к расчету вероятности связности на основе инверсий состояний сети

Даже наиболее совершенным модификациям метода, использующим многопеременную инверсию, свойственен существенный недостаток, связанный с необходимостью сравнительного анализа каждого слагаемого со всеми ранее рассмотренными на предмет уникальности содержащихся ребер, а также необходимость выполнения в ряде случаев дополнительных операций над множествами [33, 45, 46]. Для устранения подобных повторяющихся рутинных процедур целесообразно рассматривать не объединение событий связности (несвязности), вырождающееся в сумму несовместных произведений, а пересечение противоположных событий [47], приводящее также к подобной сумме, но для получения которой нет необходимости выполнять многопеременную инверсию для каждого из слагаемых над всеми ранее проанализированными [48–50].

Событие S связности графа G следует трактовать как объединение событий связности всех его подграфов, что приводит к справедливости следующего выражения для события S связности сети:

$$S = \bigcup_{i=1}^s S_i,$$

где $S_i, i = 1, \dots, s$ — событие связности i -го типового подграфа (пути, остового, а в общем случае многополюсного, дерева) случайного графа G .

Отметим, что здесь и далее событие связности типового подграфа трактуется как событие для одного из трех типов связности: для двухполюсной связности — путь или простая цепь, для всеполюсной связности — остовое дерево, для многополюсной связности — многополюсное дерево.

Каждое событие S_i связности типового подграфа является сложным и происходит только при условии связности (работоспособности) содержащихся в этом подграфе ребер, т. е.

$$S_i = \bigcap_{l_j \in S_i} l_j,$$

где $l_j, j = 1, \dots, l$ — событие связности (работоспособности) j -го ребра графа G .

По условию формулировки обобщенной модели Эрдеша — Реньи все данные события независимы, а следовательно, вероятность связности подграфа [50]

$$P(S_i) = \prod_{l_j \in S_i} P(l_j).$$

Отметим, что для события S связности графа G данная мультипликативная формула в общем случае несправедлива, поскольку события S_i связности типовых подграфов могут быть зависимы вследствие присутствия одинаковых ребер в данных подграфах [51]. Именно в этом и заключается основная проблема расчета вероятности связности, так как отдельные подграфы оказываются взаимозависимыми, а получаемые выражения не являются формами перехода к замещению.

Хорошо известный принцип двойственности [34] позволяет записать событие \bar{S} несвязности графа G как пересечение событий \bar{S}_i несвязности типовых подграфов:

$$\bar{S} = \bigcap_{i=1}^s \bar{S}_i.$$

В результате на основе формулы полной вероятности вероятность $P(S)$ связности графа выражается на основе вероятностей событий несвязности

$$P(S) = 1 - P(\bar{S}) = 1 - P\left(\bigcap_{i=1}^s \bar{S}_i\right).$$

Главным достоинством данного выражения является то, что дальнейший переход к вероятностной форме не потребует рассмотрения во всех суммах инверсии всех ранее учтенных подграфов.

Подобное выражение, в принципе, не является чем-то новым с точки зрения описания события связности отдельно взятого графа, однако с позиции дальнейшего получения формы перехода к замещению его использование имеет существенные преимущества в совокупности с рекурсивной процедурой, о которой будет сказано далее.

Достаточно просто на основе принципа двойственности формализуется выражение для события \bar{S} несвязности графа на основе событий l_j работоспособности ребер

$$\bar{S}_i = \bigcap_{l_j \in S_i} \bar{l}_j = \bigcup_{l_j \in S_i} \bar{l}_j.$$

Рекурсивная процедура приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий

Процедуру приведения заданного числа событий связности к объединению независимых событий можно рассматривать как итерационную, добавляя последовательно события несвязности подграфов. Несмотря на кажущуюся громоздкость, подобная процедура использует всего два различных преобразования. Первое из них, расщепление (рис. 1), используется наиболее часто:

$$\overline{abac} = \bar{a} \cup (a\bar{b}\bar{c}), \quad (1)$$

где a, b, c — некоторые взаимонезависимые события.

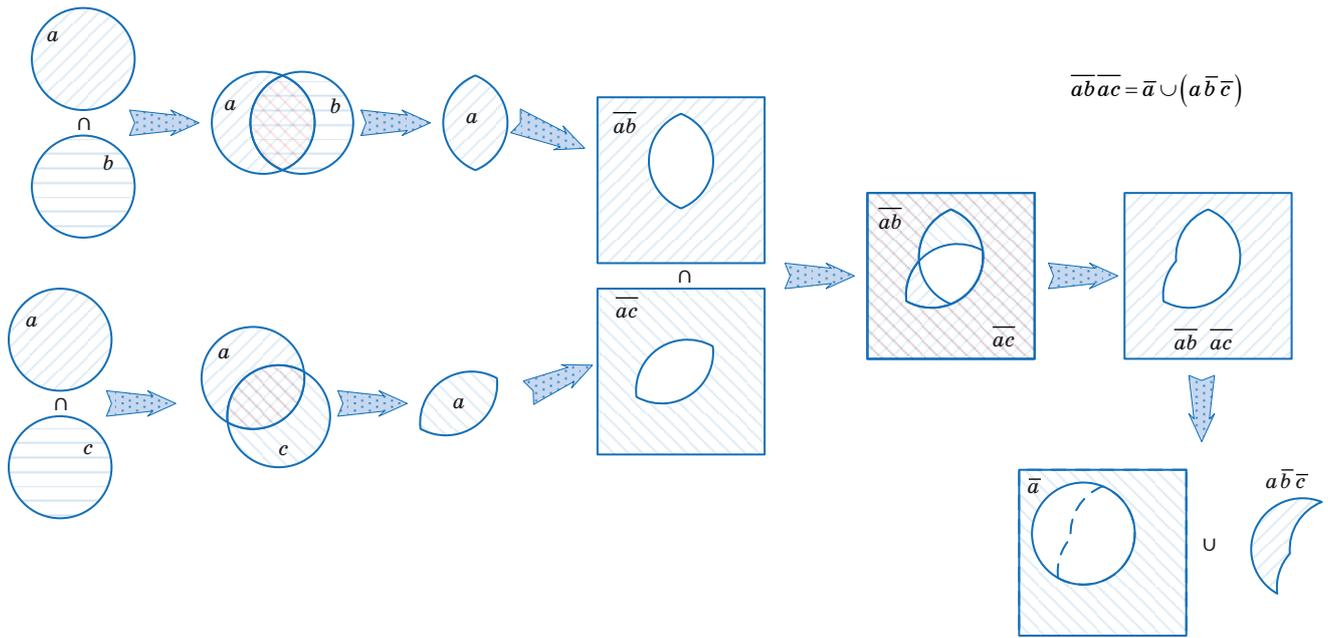
В частном случае, когда одно из отрицаний включает другое расщепление, (1) вырождается в сокращение

$$\overline{a\bar{a}c} = \bar{a}.$$

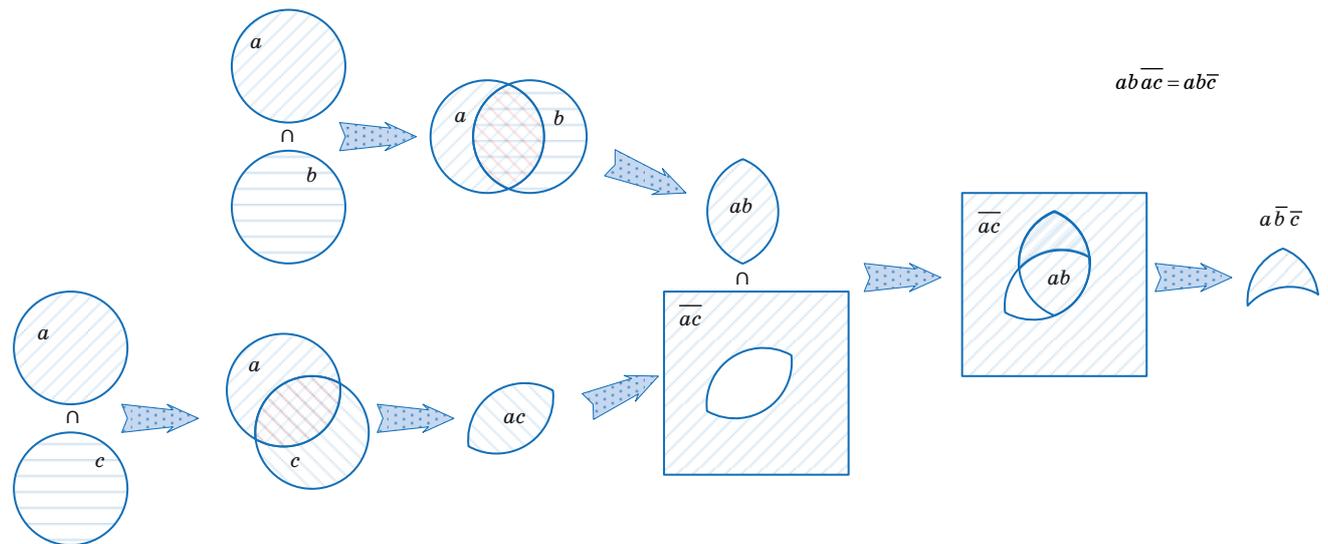
Второе, поглощение (рис. 2), применяется при условии присутствия события связности

$$ab\bar{a}c = ab\bar{c}. \quad (2)$$

В результате процедуру приведения выражения события связности графа к объединению независимых событий можно представить в форме рекурсии, каждый этап которой ассоциируется с добавлением нового события \bar{S}_i несвязности подграфа (рис. 3). Этап включает две итерации: на первой выполняется при необходимости операция поглощения (2), а на второй осуществляется последовательная процедура расщепления (1), — до того момента, пока события не окажутся независимыми. На рис. 3 римскими цифрами обозначены номера этапов, а в квадратных скобках указано количество выражений сначала для событий связности, а затем через дефис —



■ **Рис. 1.** Расщепление отрицаний двух зависимых событий
 ■ **Fig. 1.** Splitting the negatives of two dependent events



■ **Рис. 2.** Поглощение двух зависимых событий
 ■ **Fig. 2.** Absorption of two dependent events

для противоположных событий. Отметим, что операция поглощения (2) не приводит к увеличению числа объединений, а последовательная процедура расщепления (1) увеличивает число объединений на единицу, причем в результирующих выражениях все объединения имеют одно и то же количество отрицаний, за исключением последнего, где оно увеличено на единицу.

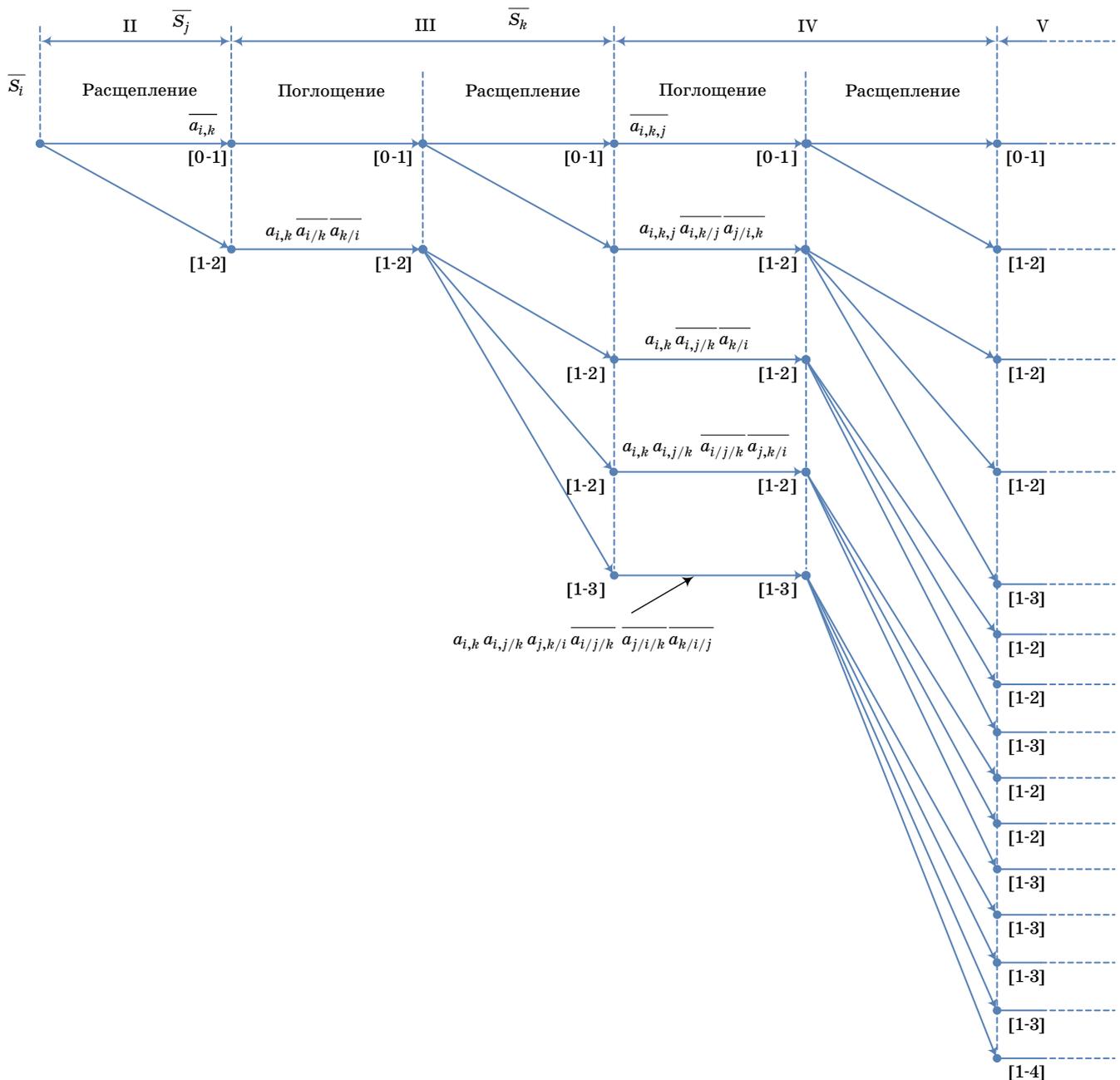
Например, процедура упрощения для двух произвольных подграфов основывается на операции расщепления (1)

$$\overline{S_i S_k} = \overline{a_{i,k} a_{i/k} a_{i,k} a_{k/i}} = \overline{a_{i,k}} \cup (a_{i,k} \overline{a_{i/k} a_{k/i}}),$$

где $a_{i,k}$ — событие связности ребер, входящих одновременно в i -й и k -й подграфы; $a_{i/k}$ — событие связности ребер, входящих в i -й и не входящих в k -й подграфы; $a_{k/i}$ — событие связности ребер, входящих в k -й и не входящих в i -й подграфы.

При этом в результате получается форма перехода к замещению, т. е.

$$P(\overline{S_i S_k}) = P(\overline{a_{i,k}}) + P(a_{i,k})P(\overline{a_{i/k} a_{k/i}}).$$



■ **Рис. 3.** Иллюстрация рекурсивной процедуры приведения выражения события связности графа к объединению независимых событий
 ■ **Fig. 3.** Illustration of a recursive procedure for reducing the expression of a graph connectivity event to a union of independent events

Для трех произвольных подграфов пересечение событий несвязности представимо в форме объединения тоже двух, но зависимых событий

$$\overline{S_i S_k S_j} = \overline{a_{i,k} S_j} \cup \left(\overline{a_{i,k} a_{i/k} a_{k/i} S_j} \right).$$

Тогда операция расщепления (1) для первого слагаемого приводит к

$$\begin{aligned} \overline{a_{i,k} S_j} &= \overline{a_{i,k,j} a_{i,k/j} a_{i,k,j} a_{j/i,k}} = \\ &= \overline{a_{i,k,j}} \cup \left(\overline{a_{i,k,j} a_{i,k/j} a_{j/i,k}} \right), \end{aligned}$$

где $a_{i,k,j}$ — событие связности ребер, входящих одновременно в i -й, k -й и j -й подграфы; $a_{i,k/j}$ — событие связности ребер, входящих в i -й и k -й и не входящих в j -й подграфы; $a_{j/i,k}$ — событие связ-

ности ребер, входящих в j -й и не входящих в i -й и k -й подграфы, а операция поглощения (2) для второго слагаемого — к

$$a_{i,k} \overline{S_j} = a_{i,k,j} a_{i,k/j} \overline{a_{i,k,j} a_{j/i,k}} = a_{i,k} \overline{a_{j/i,k}}.$$

В результате пересечение событий несвязности имеет вид двух независимых объединений и одного зависимого

$$\overline{S_i S_k S_j} = \overline{a_{i,k,j}} \cup \left(\overline{a_{i,k,j} a_{i,k/j} a_{j/i,k}} \right) \cup \left(\overline{a_{i,k} a_{j/i,k} a_{i/k} a_{k/i}} \right).$$

Использование операции расщепления (1) для последнего слагаемого приводит к

$$\begin{aligned} \overline{a_{j/i,k} a_{i/k}} &= \overline{a_{i,j/k} a_{j/i} a_{i,j/k} a_{i/j/k}} = \\ &= \overline{a_{i,j/k}} \cup \left(\overline{a_{i,j/k} a_{j/i} a_{i/j/k}} \right), \\ \overline{S_i S_k S_j} &= \overline{a_{i,k,j}} \cup \left(\overline{a_{i,k,j} a_{i,k/j} a_{j/i,k}} \right) \cup \\ &\cup \left(\overline{a_{i,k} a_{i,j/k} a_{k/i}} \right) \cup \left(\overline{a_{i,k} a_{i,j/k} a_{j/i} a_{i/j/k} a_{k/i}} \right). \end{aligned}$$

Дальнейшее применение операции расщепления (1) к последнему слагаемому формирует конечный результат

$$\begin{aligned} \overline{a_{j/i} a_{k/i}} &= \overline{a_{j,k/i} a_{j/i/k} a_{j,k/i} a_{k/i/j}} = \\ &= \overline{a_{j,k/i}} \cup \left(\overline{a_{j,k/i} a_{j/i/k} a_{k/i/j}} \right), \\ \overline{S_i S_k S_j} &= \overline{a_{i,k,j}} \cup \left(\overline{a_{i,k,j} a_{i,k/j} a_{j/i,k}} \right) \cup \\ &\cup \left(\overline{a_{i,k} a_{i,j/k} a_{k/i}} \right) \cup \left(\overline{a_{i,k} a_{i,j/k} a_{i/j/k} a_{j,k/i}} \right) \cup \\ &\cup \left(\overline{a_{i,k} a_{i,j/k} a_{j,k/i} a_{i/j/k} a_{j/i/k} a_{k/i/j}} \right), \end{aligned}$$

который является формой перехода к замещению, т. е.

$$\begin{aligned} P(\overline{S_i S_k S_j}) &= P(\overline{a_{i,k,j}}) + P(a_{i,k,j}) P(\overline{a_{i,k/j}}) P(\overline{a_{j/i,k}}) + \\ &+ P(a_{i,k}) P(\overline{a_{i,j/k}}) P(\overline{a_{k/i}}) + \\ &+ P(a_{i,k}) P(a_{i,j/k}) P(\overline{a_{i/j/k}}) P(\overline{a_{j,k/i}}) + \\ &+ P(a_{i,k}) P(a_{i,j/k}) P(a_{j,k/i}) \times \\ &\times P(\overline{a_{i/j/k}}) P(\overline{a_{j/i/k}}) P(\overline{a_{k/i/j}}). \end{aligned}$$

Стоит отметить, что данную процедуру при необходимости следует продолжать и дальше, добавляя последовательно события несвязности подграфов.

Несмотря в общем случае на очевидное катастрофическое увеличение количества объединений в результирующем выражении для события

связности графа, при реализации предложенной схемы это число оказывается существенно меньше вследствие того, что при выполнении большинства операций расщепления (1) образуются события, содержащие пересечения только независимых событий. Данная процедура основывается на хорошо известных операциях над булевыми переменными, однако сами операции поглощения и расщепления в совокупности с последовательностью их применения позволяют получить форму перехода к замещению и по сути представляют собой модификацию логико-вероятностного метода.

Пример анализа структуры графа сети связи

Рассмотрим реализацию предложенных процедур на примере и определим аналитический вид события \overline{S} несвязности графа G .

Структура сети представлена на рис. 4 [52]. Источник и сток на рисунке отмечены квадратами: $v_s = 1, v_t = 5$. Матрица смежностей графа данной сети задается формулой

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

а матрица путей (простых цепей) — выражением

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

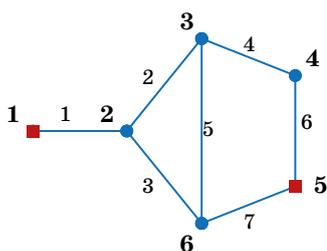
На основе матрицы путей (4) образуется аналитический вид событий их связности

$$S_1 = l_1 l_3 l_7, S_2 = l_1 l_2 l_4 l_6, S_3 = l_1 l_2 l_5 l_7, S_4 = l_1 l_3 l_4 l_5 l_6.$$

Отметим, что допустимы и эквивалентные записи в формах номеров ребер

$$S_1 = 1 \cdot 3 \cdot 7, S_2 = 1 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 6, S_3 = 1 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 7, S_4 = 1 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6,$$

и инцидентных им вершин



■ *Рис. 4.* Двухполюсный граф исследуемой сети связи
 ■ *Fig. 4.* Two-terminal graph of the studied communication network

$$S_1 = 12 \cdot 26 \cdot 56, S_2 = 12 \cdot 23 \cdot 34 \cdot 45,$$

$$S_3 = 12 \cdot 23 \cdot 36 \cdot 56, S_4 = 12 \cdot 26 \cdot 34 \cdot 36 \cdot 45,$$

где \cdot — упрощенная запись операции \cap пересечения событий, а все номера вершин и ребер упорядочены в порядке невозрастания.

Пересечение событий несвязности первых двух путей

$$\overline{S_1 S_2} = \overline{l_1 l_3 l_7 l_2 l_4 l_6}.$$

Использование процедуры расщепления (1) позволяет получить следующее объединение независимых событий:

$$\overline{S_1 S_2} = \overline{l_1} \cup \overline{l_1 l_3 l_7 l_2 l_4 l_6}.$$

Пересечение событий несвязности первых трех путей

$$\begin{aligned} \overline{S_1 S_2 S_3} &= \overline{(l_1 \cup l_1 l_3 l_7 l_2 l_4 l_6) l_1 l_2 l_5 l_7} = \\ &= \overline{l_1 l_2 l_5 l_7} \cup \overline{l_1 l_3 l_7 l_2 l_4 l_6 l_1 l_2 l_5 l_7}. \end{aligned}$$

Применение поглощения (2) ко второму члену в объединении

$$\overline{S_1 S_2 S_3} = \overline{l_1 l_2 l_5 l_7} \cup \overline{l_1 l_3 l_7 l_2 l_4 l_6 l_2 l_5 l_7}$$

с последующим однократным расщеплением (1) первого члена и двукратным вторым делает справедливым объединение независимых событий

$$\begin{aligned} \overline{S_1 S_2 S_3} &= \overline{l_1} \cup \overline{l_1 l_3 l_7} (\overline{l_2} \cup \overline{l_2 l_4 l_6 l_5 l_7}) = \\ &= \overline{l_1} \cup \overline{l_1 l_2 l_3 l_7} \cup \overline{l_1 l_2 l_3 l_7 l_4 l_6 l_5 l_7} = \\ &= \overline{l_1} \cup \overline{l_1 l_2 l_3 l_7} \cup \overline{l_1 l_2 l_4 l_6} (\overline{l_7} \cup \overline{l_7 l_3 l_5}) = \\ &= \overline{l_1} \cup \overline{l_1 l_2 l_3 l_7} \cup \overline{l_1 l_2 l_4 l_6 l_7} \cup \overline{l_1 l_2 l_7 l_3 l_4 l_6 l_5}. \end{aligned}$$

Пересечение событий несвязности всех четырех путей

$$\begin{aligned} \overline{S_1 S_2 S_3 S_4} &= (\overline{l_1} \cup \overline{l_1 l_2 l_3 l_7} \cup \overline{l_1 l_2 l_4 l_6 l_7} \cup \\ &\cup \overline{l_1 l_2 l_7 l_3 l_4 l_6 l_5}) \overline{l_1 l_3 l_4 l_5 l_6} = \\ &= \overline{l_1 l_3 l_4 l_5 l_6} \cup \overline{l_1 l_2 l_3 l_7 l_1 l_3 l_4 l_5 l_6} \cup \\ &\cup \overline{l_1 l_2 l_4 l_6 l_7 l_1 l_3 l_4 l_5 l_6} \cup \overline{l_1 l_2 l_7 l_3 l_4 l_6 l_5 l_1 l_3 l_4 l_5 l_6}. \end{aligned}$$

Применение поглощения (2) ко второму, третьему и четвертому членам в объединении

$$\begin{aligned} \overline{S_1 S_2 S_3 S_4} &= \overline{l_1 l_3 l_4 l_5 l_6} \cup \overline{l_1 l_2 l_3 l_7 l_3 l_4 l_5 l_6} \cup \\ &\cup \overline{l_1 l_2 l_4 l_6 l_7 l_3 l_4 l_5 l_6} \cup \overline{l_1 l_2 l_7 l_3 l_4 l_6 l_5 l_3 l_4 l_5 l_6} \end{aligned}$$

с последующим однократным расщеплением (1) всех членов делает справедливым объединение независимых событий

$$\begin{aligned} \overline{S} &= \overline{S_1 S_2 S_3 S_4} = \overline{l_1} \cup \overline{l_1 l_2} (\overline{l_3} \cup \overline{l_3 l_7 l_4 l_5 l_6}) \cup \\ &\cup \overline{l_1 l_2 l_4 l_6 l_7} \cup \overline{l_1 l_2 l_7 l_3 l_4 l_6 l_5} = \overline{l_1} \cup \overline{l_1 l_2 l_3} \cup \\ &\cup \overline{l_1 l_2 l_4 l_5 l_6 l_7} \cup \overline{l_1 l_2 l_4 l_6 l_7} \cup \overline{l_1 l_2 l_7 l_3 l_4 l_6 l_5}, \end{aligned} \quad (5)$$

которое, по сути, и является аналитическим видом события \overline{S} несвязности графа G .

Отметим, что в результирующем выражении оказалось всего пять членов в объединении, что существенно ниже количества для общего случая (см. рис. 3).

Заключение

Таким образом, в работе доказана возможность устранения повторяющихся рутинных процедур, свойственных методам, использующим многопеременную инверсию, путем рассмотрения не объединения событий связности (несвязности), вырождающегося в сумму несовместных произведений, а пересечения противоположных событий, приводящего также к подобной сумме, но для получения которой нет необходимости выполнять многопеременную инверсию для каждого из слагаемых над всеми ранее проанализированными [33, 43, 47, 53, 54]. Полученные аналитические соотношения могут быть применены при анализе надежности, живучести или устойчивости сложноразветвленных телекоммуникационных сетей [25, 45, 46].

Литература

1. **Mateti P., Deo N.** On algorithms for enumerating all circuits of a graph. *SIAM J. Comput.*, 1976, vol. 5, no. 1, pp. 90–99. doi:https://doi.org/10.1137/0205007

2. Char J. Generation of trees, two-trees, and storage of master forests. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1968, vol. 15, iss. 3, pp. 228–238. doi:https://doi.org/10.1109/TCT.1968.1082817
3. Мигов Д. А. Декомпозиция сети по сечениям при расчете ее надежности. *Прикладная дискретная математика*, 2020, № 47, с. 62–86. doi:https://doi.org/10.17223/20710410/47/6
4. Valiant L. The complexity of enumeration and reliability problems. *SIAM J. Comput.*, 1979, vol. 8, no. 3, pp. 410–421. doi:https://doi.org/10.1137/0208032
5. Page L. V., Perry J. E. A practical implementation of the factoring theorem for network reliability. *IEEE Trans. Reliability*, 1988, vol. 37, no. 3, pp. 259–267. doi:https://doi.org/10.1109/24.3752
6. Рябинин И. А. Логико-вероятностное исчисление как аппарат исследования надежности и безопасности структурно-сложных систем. *Автоматика и телемеханика*, 2003, т. 7, с. 178–186. doi:https://doi.org/10.1023/A:1024798521540
7. Satyanarayana A., Wood R. K. A linear-time algorithm for computing k-terminal reliability in series-parallel networks. *SIAM J. Comput.*, 1985, vol. 18, pp. 818–883. doi:https://doi.org/10.1137/0214057
8. Shooman A. M., Kershenbaum A. Methods for communication-network reliability analysis: probabilistic graph reduction. *IEEE Proc. Reliability and Maintainability Symp.*, 1992, Las Vegas, USA, N.Y., IEEE Press, 1992, pp. 441–448. doi:https://doi.org/10.1109/ARMS.1992.187862
9. Wood R. K. A factoring algorithm using polygon-to-chain reductions for computing k-terminal network reliability. *Networks*, 1985, vol. 15, no. 2, pp. 173–190. doi:https://doi.org/10.1002/net.3230150204
10. Levendovszky J., Jereb L., Elek Zs., and Vesztergombi Gy. Adaptive statistical algorithms in network reliability analysis. *Performance Evaluation*, 2002, vol. 48, no. 1–4, pp. 225–236. doi:https://10.1016/s0166-5316(02)00038-x
11. Цицашвили Г. Ш., Осипова М. А., Лосев А. С. Вывод асимптотических констант для вероятности несвязности планарного взвешенного графа. *Прикладная дискретная математика*, 2014, № 2(24), с. 97–100.
12. Цицашвили Г. Ш., Осипова М. А., Лосев А. С. Асимптотика вероятности связности графа с низконадёжными ребрами. *Прикладная дискретная математика*, 2013, № 1(19), с. 93–98.
13. Цицашвили Г. Ш., Осипова М. А., Лосев А. С. Асимптотики вероятностей связности пар вершин графа. *Прикладная дискретная математика*, Прилож., 2013, № 6, с. 90–92.
14. Цицашвили Г. Ш., Лосев А. С. Связность планарного графа с высоконадёжными ребрами. *Прикладная дискретная математика*, 2012, № 3(17), с. 103–107.
15. Chen Y., Li J., and Chen J. A new algorithm for network probabilistic connectivity. *Proc. IEEE Military Communications Conf.*, N.Y., IEEE Press, 1999, vol. 2, pp. 920–923. doi:https://10.1109/MILCOM.1999.821337
16. Reichelt D., Rothlauf F. Reliable communication network design with evolutionary algorithms. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 2005, vol. 5, pp. 251–266. doi:10.1142/S146902680500160X
17. Родионов А. С., Родионова О. К. Некоторые методы ускорения расчета надежности информационных сетей. *Тр. 30-й Междунар. конф. «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе» (IT+SF'2003)*, Гурзуф, Украина, 2003; Запорожье, Изд-во Запорож. ун-та, 2003, с. 215–217.
18. Мигов Д. А. Формулы для быстрого расчета вероятности связности подмножества вершин в графах небольшой размерности. *Проблемы информатики*, 2010, № 2(6), с. 10–17.
19. Tittmann P. Partitions and network reliability. *Discr. Appl. Math.*, 1999, vol. 95, no. 1–3, pp. 445–453.
20. Филин Б. П. *Методы анализа структурной надежности сетей связи*. М., Радио и связь, 1988. 208 с.
21. Филин Б. П. Об аналитическом методе приближенного вычисления надежности сложных систем. *Автоматика и телемеханика*, 1982, № 11, с. 159–170.
22. Won J.-M., Karray F. Cumulative update of all-terminal reliability for faster feasibility decision. *IEEE Trans. Reliability*, 2010, vol. 59, no. 3, pp. 551–562. doi:https://doi.org/10.1109/TR.2010.2055924
23. Rodionov A., Migov D., and Rodionov O. Improvements in the efficiency of cumulative updating of all terminal network reliability. *IEEE Trans. Reliability*, 2012, vol. 61, no. 2, pp. 460–465. doi:https://doi.org/10.1109/TR.2012.2196172
24. Martinez S. P., Calvino B. O., Rocco S. C. M. All-terminal reliability evaluation through a Monte Carlo simulation based on an MPI implementation. *European Safety and Reliability Conference: Advances in Safety, Reliability and Risk Management (PSAM 2011/ESREL 2012)*, Helsinki, 2012, pp. 1–6.
25. Silva J., Gomes T., Tipper D., Martins L., Kounev V. An effective algorithm for computing all-terminal reliability bounds. *Networks*, vol. 66, iss. 4, pp. 282–295. doi:10.1002/net.21634
26. Abraham J. A. An improved algorithm for network reliability. *IEEE Trans Reliab*, 1979, vol. R-28, pp. 58–61. doi:https://doi.org/10.1109/TR.1979.5220476
27. Locks M. O. A minimizing algorithm for sum of disjoint products. *IEEE Trans Reliab*, 1987, vol. R-36, pp. 445–453. doi:https://doi.org/10.1109/TR.1987.5222436
28. Wilson J. M. An improved minimizing algorithm for sum of disjoint products. *IEEE Trans Reliab*, 1990, vol. 39, pp. 42–45. doi:https://doi.org/10.1109/24.52639

29. **Beichelt F., Spross L.** An improved Abraham-method for generating disjoint sums. *IEEE Trans Reliab*, 1987, vol. R-36, pp. 70–74. doi:<https://doi.org/10.1109/TR.1987.5222298>
30. **Beichelt F., Spross L.** Comment on “An improved Abraham-method for generating disjoint sums”. *IEEE Trans Reliab*, 1989, vol. 38, pp. 422–424. doi:<https://doi.org/10.1109/24.46454>
31. **Heidtmann K. D.** Smaller sums of disjoint products by subproduct inversion. *IEEE Trans Reliab*, 1989, vol. 38, pp. 305–311. doi:<https://doi.org/10.1109/24.44172>
32. **Gomes T., Craveirinha J.** An alternative method for calculating the probability of an union of events. *European Conference on System Dependability and Safety (ESRA 2002/lambda-Mu13)*, Lyon, France, March 19–21, 2002, vol. 2, pp. 426–430.
33. **Chaturvedi S. K.** *Network Reliability Measures and Evaluation*. Scrivener Publishing LLC, 2016. 237 p. doi:<https://doi.org/10.1002/9781119224006>
34. **Рябинин И. А., Черкесов Г. Н.** *Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем*. М., Радио и связь, 1981. 264 с.
35. **Батенков К. А.** Числовые характеристики структур сетей связи. *Труды СПИИРАН*, 2017, № 4 (53), с. 5–28. <https://doi.org/10.15622/sp.53.1>
36. **Батенков К. А., Батенков А. А.** Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости. *Труды СПИИРАН*, 2018, № 3 (58), с. 128–159. <https://doi.org/10.15622/sp.58.6>
37. **Shengjie Xu, Yi Qian, Rose Qingyang Hu.** Reliable and resilient access network design for advanced metering infrastructures in smart grid. *IET Smart Grid*, 2018, vol. 1, iss. 1, p. 24–30. doi:10.1049/iet-stg.2018.0008
38. **Xu S., Qian Y., Hu R. Q.** A data-driven preprocessing scheme on anomaly detection in big data applications. *Proc. in 2017 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Atlanta, GA, USA, May 2017, pp. 814–819. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMW.2017.8116481>
39. **Ye F., Qian Y., Hu R. Q., et al.** Reliable energy-efficient uplink transmission for neighborhood area networks in smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015, vol. 6, iss. 5, pp. 2179–2188. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2392130>
40. **Ye F., Qian Y., Hu R. Q.** Energy efficient self-sustaining wireless neighborhood area network design for smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015, vol. 6, iss. 1, pp. 220–229. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2344659>
41. **Ye F., Liang Y., Zhang H., et al.** Design and analysis of a wireless sensor based monitoring network for transmission lines in smart grid. *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, 2016, vol. 16, iss. 10, pp. 1209–1220.
42. **Xu S., Qian Y.** Quantitative study of reliable communication infrastructure in smart grid NAN. *Proc. in Design of Reliable Communication Networks*, Kansas City, MO, USA, 2015, pp. 93–94. <https://doi.org/10.1109/DRCN.2015.7148994>
43. **Zuev K. M., Wu S. & Beck J. L.** Network reliability problem and its efficient solution by subset simulation. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2015, vol. 40, pp. 25–35. doi:10.1016/J.PROBENGMECH.2015.02.002
44. **ГОСТ Р 53111–2008.** *Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки*. М., Стандартинформ, 2009. 16 с.
45. **Zhang H. C., Xu D. L., Lu C., Qi E. R., Tian C., Wu Y. S.** Connection effect on amplitude death stability of multi-module floating airport. *Ocean Eng.*, 2017, vol. 129, pp. 46–56. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.11.011
46. **Pino W., Gomes T., Kooij R.** A comparison between two all-terminal reliability algorithms. *Journal of Advances in Computer Networks*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.18178/JACN.2015.3.4.183>
47. **Paredes R., Duenas-Osorio L., Meel K. S., Vardi M. Y.** *Network Reliability Estimation in Theory and Practice*. Preprint submitted to Reliability Engineering & System Safety, 2018. 26 p.
48. **Батенков А. А., Батенков К. А., Фокин А. Б.** Методы формирования множеств состояний телекоммуникационных сетей для различных мер связности. *Труды СПИИРАН*, 2020, т. 19, № 3, с. 644–673. <https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.3.7>
49. **Батенков К. А.** Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний. *Труды СПИИРАН*, 2019, т. 18, № 5, с. 1093–1118. <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118>
50. **Райгородский А. М.** Модели случайных графов и их применения. *Труды МФТИ*, 2010, т. 2, № 4, с. 130–140.
51. **Lin M., Ting C.** A polynomial-time algorithm for computing K-terminal residual reliability of d-trapezoid graphs. *Inf. Process. Lett.*, 2015, vol. 115, iss. 2, pp. 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.ipl.2014.10.013>
52. **Батенков А. А., Батенков К. А., Фокин А. Б.** Формирование сечений телекоммуникационных сетей для анализа их устойчивости с различными мерами связности. *Информатика и автоматизация*, 2021, № 2 (20), с. 371–406. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.5>
53. **Housni K.** An efficient algorithm for enumerating all minimal paths of a graph. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2019, vol. 10, pp. 450–460. doi:10.14569/IJACSA.2019.0100159
54. **Bai G. H., Tian Z. G., Zuo M. J.** An improved algorithm for finding all minimal paths in a network. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 150, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.01.011>

UDC 004.722

doi:10.31799/1684-8853-2021-6-53-63

Analysis of the probability of connectivity of a telecommunications network based on the reduction of several non-connectivity events to a union of independent eventsA. A. Batenkov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-7515-5774K. A. Batenkov^b, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-6083-1242, pustur@yandex.ruA. B. Fokin^b, Researcher, orcid.org/0000-0002-2187-7325^aOryol State University named after I. S. Turgenev, 95, Komsomolskaya St., 302026, Oryol, Russian Federation^bAcademy of Federal Guard Service of Russian Federation, 35, Priborostroitelnaya St., 302015, Oryol, Russian Federation

Introduction: For large and structurally complex telecommunication networks, calculating the connectivity probability turns out to be a very cumbersome and time-consuming process due to the huge number of elements in the resulting expression. The most expedient way out of this situation is a method based on the representation of a network connectivity event in the form of sums of products of incompatible events. However, this method also requires performing additional operations on sets in some cases. **Purpose:** To eliminate the main disadvantages of the method using multi-variable inversion. **Results:** It is shown that the connectivity event of a graph should be interpreted as a union of connectivity events of all its subgraphs, which leads to the validity of the expression for the connectivity event of the network in the form of a union of connectivity events of typical subgraphs (path, backbone, and in general, a multi-pole tree) of the original random graph. An iterative procedure is proposed for bringing a given number of connectivity events to the union of independent events by sequentially adding subgraph disjoint events. The possibility of eliminating repetitive routine procedures inherent in methods using multi-variable inversion is proved by considering not the union of connectivity events (incoherence) degenerating into the sum of incompatible products, but the intersection of opposite events, which also leads to a similar sum. However, to obtain this sum, there is no need to perform a multi-variable inversion for each of the terms over all those previously analyzed. **Practical relevance:** The obtained analytical relations can be applied in the analysis of reliability, survivability or stability of complex telecommunications networks.

Keywords — probability of connectivity, graph, telecommunications network, multi-variable inversion, form of transition to substitution.

For citation: Batenkov A. A., Batenkov K. A., Fokin A. B. Analysis of the probability of connectivity of a telecommunications network based on the reduction of several non-connectivity events to a union of independent events. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 53–63 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-53-63

References

- Mateti P., Deo N. On algorithms for enumerating all circuits of a graph. *SIAM J. Comput.*, 1976, vol. 5, no. 1, pp. 90–99. doi:https://doi.org/10.1137/0205007
- Char J. Generation of trees, two-trees, and storage of master forests. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1968, vol. 15, iss. 3, pp. 228–238. doi:https://doi.org/10.1109/TCT.1968.1082817
- Migov D. A. Vertex decomposition to calculate the network probabilistic connectivity. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika*, 2020, no. 47, pp. 62–86 (In Russian). doi:https://doi.org/10.17223/20710410/47/6
- Valiant L. The complexity of enumeration and reliability problems. *SIAM J. Comput.*, 1979, vol. 8, no. 3, pp. 410–421. doi:https://doi.org/10.1137/0208032
- Page L. B., Perry J. E. A practical implementation of the factoring theorem for network reliability. *IEEE Trans. Reliability*, 1988, vol. 37, no. 3, pp. 259–267. doi:https://doi.org/10.1109/24.3752
- Ryabinin I. A. Logical-probabilistic calculus: A tool for studying the reliability and safety of structurally complex systems. *Automation and Remote Control*, 2003, vol. 64, no. 7, pp. 1177–1185. doi:https://doi.org/10.1023/A:1024798521540
- Satyanarayana A., Wood R. K. A linear-time algorithm for computing K-terminal reliability in series-parallel networks. *SIAM J. Comput.*, 1985, vol. 18, pp. 818–883. doi:https://doi.org/10.1137/0214057
- Shooman A. M., Kershbaum A. Methods for communication-network reliability analysis: probabilistic graph reduction. *IEEE Proc. Reliability and Maintainability Symp.*, 1992, Las Vegas, USA, N.Y., IEEE Press, 1992, pp. 441–448. doi:https://doi.org/10.1109/ARMS.1992.187862
- Wood R. K. A factoring algorithm using polygon-to-chain reductions for computing k-terminal network reliability. *Networks*, 1985, vol. 15, no. 2, pp. 173–190. doi:https://doi.org/10.1002/net.3230150204
- Levendovszky J., Jereb L., Elek Zs., and Vesztergombi Gy. Adaptive statistical algorithms in network reliability analysis. *Performance Evaluation*, 2002, vol. 48, no. 1–4, pp. 225–236. doi:https://10.1016/s0166-5316(02)00038-x
- Tsitsiashvili G. Sh., Osipova M. A., Losev A. S. Proof of asymptotic constants in disconnection probability for weighted planar graph. *Prikladnaya diskretnaya matematika*, 2014, no. 2(24), pp. 97–100 (In Russian).
- Tsitsiashvili G. Sh., Osipova M. A., Losev A. S. Asymptotics for connectivity probability of graph with low reliable arcs. *Prikladnaya diskretnaya matematika*, 2013, no. 1(19), pp. 93–98 (In Russian).
- Tsitsiashvili G. Sh., Osipova M. A., Losev A. S. Asymptotics of connectivity probabilities for pairs of graph nodes. *Prikladnaya diskretnaya matematika*, Suppl., 2013, no. 6, pp. 90–92 (In Russian).
- Tsitsiashvili G. Sh., Losev A. S. Connectivity of the planar graph with highly reliable edges. *Prikladnaya diskretnaya matematika*, 2012, no. 3(17), pp. 103–107 (In Russian).
- Chen Y., Li J., and Chen J. A new algorithm for network probabilistic connectivity. *Proc. IEEE Military Communications Conf.*, N.Y., IEEE Press, 1999, vol. 2, pp. 920–923. doi:https://10.1109/MILCOM.1999.821337
- Reichelt D., Rothlauf F. Reliable communication network design with evolutionary algorithms. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 2005, vol. 5, pp. 251–266. doi:10.1142/S146902680500160X
- Rodionov A. S. and Rodionova O. K. Some methods for speeding up the calculation of the reliability of information networks. *Proc. 30th Int. Conf. "Information Technologies in Science, Education, Telecommunications and Business" (IT+SE'2003)*, Gurzuf, Ukraine, 2003; Zaporozhye, Zaporozhye State University Publ., 2003, pp. 215–217 (In Russian).
- Migov D. S. Formulas for quickly calculating the probabilistic connectivity of a subset of vertices in graphs of small dimension. *Problemy informatiki*, 2010, no. 2 (6), pp. 10–17 (In Russian).
- Tittmann P. Partitions and network reliability. *Discr. Appl. Math.*, 1999, vol. 95, no. 1–3, pp. 445–453.

20. Filin B. P. *Metody analiza strukturnoj nadezhnosti setej svyazi* [Methods for analyzing the structural reliability of communication networks]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1988. 208 p. (In Russian).
21. Filin B. P. On an analytical method for approximate computation of reliability of complex systems. *Automation and Remote Control*, no. 11, pp. 159–170 (In Russian).
22. Won J.-M., Karray F. Cumulative update of all-terminal reliability for faster feasibility decision. *IEEE Trans. Reliability*, 2010, vol. 59, no. 3, pp. 551–562. doi:<https://doi.org/10.1109/TR.2010.2055924>
23. Rodionov A., Migov D., and Rodionov O. Improvements in the efficiency of cumulative updating of all terminal network reliability. *IEEE Trans. Reliability*, 2012, vol. 61, no. 2, pp. 460–465. doi:<https://doi.org/10.1109/TR.2012.2196172>
24. Martinez S. P., Calvino B. O., Rocco S. C. M. All-terminal reliability evaluation through a Monte Carlo simulation based on an MPI implementation. *European Safety and Reliability Conference: Advances in Safety, Reliability and Risk Management (PSAM 2011/ESREL 2012)*, Helsinki, 2012, pp. 1–6.
25. Silva J., Gomes T., Tipper D., Martins L., Kounev V. An effective algorithm for computing all-terminal reliability bounds. *Networks*, vol. 66, iss. 4, pp. 282–295. doi:[10.1002/net.21634](https://doi.org/10.1002/net.21634)
26. Abraham J. A. An improved algorithm for network reliability. *IEEE Trans Reliab*, 1979, vol. R-28, pp. 58–61. doi:<https://doi.org/10.1109/TR.1979.5220476>
27. Locks M. O. A minimizing algorithm for sum of disjoint products. *IEEE Trans Reliab*, 1987, vol. R-36, pp. 445–453. doi:<https://doi.org/10.1109/TR.1987.5222436>
28. Wilson J. M. An improved minimizing algorithm for sum of disjoint products. *IEEE Trans Reliab*, 1990, vol. 39, pp. 42–45. doi:<https://doi.org/10.1109/24.52639>
29. Beichelt F., Spross L. An improved Abraham-method for generating disjoint sums. *IEEE Trans Reliab*, 1987, vol. R-36, pp. 70–74. doi:<https://doi.org/10.1109/TR.1987.5222298>
30. Beichelt F., Spross L. Comment on “An improved Abraham-method for generating disjoint sums”. *IEEE Trans Reliab*, 1989, vol. 38, pp. 422–424. doi:<https://doi.org/10.1109/24.46454>
31. Heidtmann K. D. Smaller sums of disjoint products by sub-product inversion. *IEEE Trans Reliab*, 1989, vol. 38, pp. 305–311. doi:<https://doi.org/10.1109/24.44172>
32. Gomes T., Craveirinha J. An alternative method for calculating the probability of an union of events. *European Conference on System Dependability and Safety (ESRA 2002/lambda-Mu13)*, Lyon, France, March 19–21, 2002, vol. 2, pp. 426–430.
33. Chaturvedi S. K. *Network Reliability Measures and Evaluation*. Scrivener Publishing LLC, 2016. 237 p. doi:<https://doi.org/10.1002/9781119224006>
34. 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 i sviaz' Publ., 1981. 264 p. (In Russian).
35. Batenkov K. A. Numeric features of networking. *SPIIRAS Proceedings*, 2017, vol. 4(53), pp. 5–28 (In Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.53.1>
36. Batenkov K. A., Batenkov A. A. Analysis and synthesis of communication network structures according to the determined stability indicators. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, vol. 3(58), pp. 128–159 (In Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.58.6>
37. Shengjie Xu, Yi Qian, Rose Qingyang Hu. Reliable and resilient access network design for advanced metering infrastructures in smart grid. *IET Smart Grid*, 2018, vol. 1, iss. 1, p. 24–30. doi:[10.1049/iet-stg.2018.0008](https://doi.org/10.1049/iet-stg.2018.0008)
38. Xu S., Qian Y., Hu R. Q. A data-driven preprocessing scheme on anomaly detection in big data applications. *Proc. in 2017 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, Atlanta, GA, USA, May 2017, pp. 814–819. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMW.2017.8116481>
39. Ye F., Qian Y., Hu R. Q., et al. Reliable energy-efficient up-link transmission for neighborhood area networks in smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015, vol. 6, iss. 5, pp. 2179–2188. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2392130>
40. Ye F., Qian Y., Hu R. Q. Energy efficient self-sustaining wireless neighborhood area network design for smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015, vol. 6, iss. 1, pp. 220–229. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2344659>
41. Ye F., Liang Y., Zhang H., et al. Design and analysis of a wireless sensor based monitoring network for transmission lines in smart grid. *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, 2016, vol. 16, iss. 10, pp. 1209–1220.
42. Xu S., Qian Y. Quantitative study of reliable communication infrastructure in smart grid NAN. *Proc. in Design of Reliable Communication Networks*, Kansas City, MO, USA, 2015, pp. 93–94. <https://doi.org/10.1109/DRCN.2015.7148994>
43. Zuev K. M., Wu S., Beck J. L. Network reliability problem and its efficient solution by subset simulation. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2015, vol. 40, pp. 25–35. doi:[10.1016/J.PROBENGMECH.2015.02.002](https://doi.org/10.1016/J.PROBENGMECH.2015.02.002)
44. GOST R 53111–2008. *Stability of the public communication network. Requirements and verification methods*. Moscow, Standardinform Publ., 2009. 16 p.
45. Zhang H. C., Xu D. L., Lu C., Qi E. R., Tian C., Wu Y. S. Connection effect on amplitude death stability of multi-module floating airport. *Ocean Eng.*, 2017, vol. 129, pp. 46–56. doi:[10.1016/j.oceaneng.2016.11.011](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.011)
46. Pino W., Gomes T., Kooij R. A comparison between two all-terminal reliability algorithms. *Journal of Advances in Computer Networks*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.18178/JACN.2015.3.4.183>
47. Paredes R., Duenas-Osorio L., Meel K. S., Vardi M. Y. *Network Reliability Estimation in Theory and Practice*. Preprint submitted to Reliability Engineering & System Safety, 2018. 26 p.
48. Batenkov K. A., Batenkov A. A., Fokin A. B. Methods for generating sets of telecommunication network states for various connectivity measures. *SPIIRAS Proceedings*, 2020, vol. 19, no. 3, pp. 644–673 (In Russian). doi:[10.15622/sp.2020.19.3.7](https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.3.7)
49. Batenkov K. A. Accurate and boundary estimate of communication network connectivity probability based on model state complete enumeration method. *SPIIRAS Proceedings*, 2019, vol. 18, no. 5, pp. 1093–1118 (In Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118>
50. Raigorodskiy A. M. Random graph models and their applications. *Trudy MFTI*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 130–140 (In Russian).
51. Lin M., Ting C. A polynomial-time algorithm for computing K-terminal residual reliability of d-trapezoid graphs'. *Inf. Process. Lett.*, 2015, vol. 115, iss. 2, pp. 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.ipl.2014.10.013>
52. Batenkov A. A., Batenkov K. A., Fokin A. B. Forming the telecommunication networks' cross-sections to analyze the latter stability with different connectivity measures. *Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 371–406 (In Russian). <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.5>
53. Housni K. An efficient algorithm for enumerating all minimal paths of a graph. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2019, vol. 10, pp. 450–460. doi:[10.14569/IJACSA.2019.0100159](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100159)
54. Bai G. H., Tian Z. G., Zuo M. J. An improved algorithm for finding all minimal paths in a network. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 150, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.01.011>

Методология и информационно-измерительная система для персонифицированного синтеза протезов нижних конечностей

Л. М. Смирнова^{а,б}, доктор техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-4373-9342, info@diaserv.ru

Г. Н. Пономаренко^{б,в}, доктор мед. наук, профессор, orcid.org/0000-0001-7853-4473

В. Г. Суслев^б, канд. мед. наук, ведущий научный сотрудник, orcid.org/0000-0003-0651-5497

^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Профессора Попова ул., 5, Санкт-Петербург, 197376, РФ

^бФедеральный научный центр реабилитации инвалидов им. Г. А. Альбрехта, Бестужевская ул., 50, Санкт-Петербург, 195067, РФ

^вСеверо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, Кирочная ул., 41, Санкт-Петербург, 191015, РФ

Введение: одним из методов управления качеством протезирования является оптимизация состава комплектующих модульного протеза. Ошибки выбора моделей функциональных модулей протеза приводят к ограничению реализации потенциальных возможностей пациента или к выбору дорогостоящих высокофункциональных моделей, потенциальные возможности которых не могут быть в полной мере реализованы при имеющихся нарушениях систем организма. Одним из эффективных путей разрешения этой проблемы является использование возможностей компьютерных технологий.

Цель: обоснование методологии разработки инновационной компьютерной технологии персонифицированного синтеза протеза нижней конечности, включая разработку структуры информационно-измерительной системы для ее реализации. **Методы:** методы анализа, синтеза и аналогии; экспертный опрос; метод анализа иерархий («метод Саати»). При описании факторов, влияющих на требования к характеристикам протезных модулей, использовался понятийный язык Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья. **Результаты:** для выбора моделей протезных модулей обосновано использование расширенной системы факторов, которая включает как базовые факторы назначения продукции, указанные в каталогах, так и дополнительные факторы: показатели нарушения структур и функций организма; возможность и реализация активности и участия пациента; наличие барьеров и облегчающих факторов окружающей среды, в которой планируется использовать протез. С учетом этой системы факторов разработана структурная схема информационно-измерительной системы для обследования протезируемого. Для выбора комплектующих протеза обоснована необходимость создания глобального электронного каталога, объединяющего структурированную информацию о моделях протезных модулей, поставляемых различными производителями. Предложена матричная форма представления базы знаний, отражающей правила выбора моделей по соответствию их характеристик оценкам факторов, и обоснована методика компьютеризированного выбора моделей из электронного каталога. **Практическая значимость:** результаты работы являются шагом по пути создания технологии компьютеризированного многокритериального выбора комплектующих модульного протеза с учетом персональных потребностей и функциональных возможностей пациента. Применение такой технологии позволит повысить уровень реабилитации пациента и качество его жизни.

Ключевые слова – информационно-измерительная медицинская система, синтез протеза, управление качеством протеза, многокритериальный выбор, база знаний, медицинская реабилитация.

Для цитирования: Смирнова Л. М., Пономаренко Г. Н., Суслев В. Г. Методология и информационно-измерительная система для персонифицированного синтеза протезов нижних конечностей. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 6, с. 64–74. doi:10.31799/1684-8853-2021-6-64-74

For citation: Smirnova L. M., Ponomarenko G. N., Suslyev V. G. Methodology and information-measuring system for personalized synthesis of lower limb prostheses. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 64–74 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-64-74

Введение

Имеются данные о росте количества инвалидов с постампутационными дефектами конечностей. Например, по состоянию на 2005 г. среди населения США один из 190 человек имел ампутированную конечность, и прогноз указывает на двукратное увеличение числа таких людей к 2050 г. вследствие общемировой тенденции к старению населения и связанного с этим риска заболеваний сосудов конечностей [1].

Модульное построение протеза (из промышленно выпускаемых функциональных узлов — модулей) — основа современного протезирования, но ошибки при выборе комплектующих протеза приводят в одних случаях к ограничению реализации потенциальных возможностей протезированного, неудовлетворению его потребностей и снижению качества жизни, в других — нерациональному распределению финансовых затрат из-за необоснованного выбора дорогостоящих высокофункциональных моделей, потен-

циальные возможности которых не могут быть в полной мере реализованы инвалидом при имеющихся структурных нарушениях и функциональных ограничениях систем организма.

Одним из методов управления качеством модульного протезирования является оптимизация состава комплектующих путем выбора моделей протезных модулей (узлов) с учетом социально-бытовых потребностей и персональных предпочтений протезируемого, с одной стороны, и структурных нарушений, функциональных ограничений его организма, с другой стороны.

Необходимость персонализированного подхода к протезированию провозглашена и признана в мире. При модульном протезировании такой подход частично обеспечивается тем, что некоторые производители протезной продукции представляют в своих каталогах обоснованные рекомендации по выбору протезных модулей по основным показателям их назначения: возрастной группе протезируемого, уровню двигательной активности (низкая, средняя и т. д.); массе тела; планируемому основному режиму эксплуатации протеза (для обычной жизнедеятельности, занятий адаптивными видами спорта и пр.) [2, 3]. Зная эти показатели, специалисты протезно-ортопедических предприятий подбирают модели модулей протеза перебором информации о них по печатным или электронным каталогам, учитывая также конструкционную сочетаемость моделей для объединения в одном протезе.

Низкая эффективность такого выбора заключается в продолжительности и сложности принятия решения при просмотре большого ассортимента продукции, высокого риска игнорирования наличия альтернативных конструкций при использовании ограниченного количества каталогов. Кроме того, несмотря на то, что уровень двигательной активности инвалида используется как основной прогностический фактор восстановления двигательной активности на протезе, этому показателю свойственна высокая субъективность, так как он оценивается методом опроса пациента [4–6]. Более объективной является оценка двигательных возможностей протезируемого с помощью предиктора мобильности — международного инструмента оценки мобильных функций с выполнением двигательных тестов на протезе и без него [7]. Но и она, хотя интегрально, но лишь косвенно отражает состояние систем организма, уровень функционирования которых прямо влияет на показания и противопоказания к назначению протезных модулей с определенными характеристиками и свойствами [8].

Одним из эффективных способов обоснованного многокритериального выбора комплектующих модульного протеза является использование воз-

можностей компьютерных технологий. Однако имеются лишь единичные источники с описанием таких технологий [9–11]. Поэтому мы считаем целесообразным поделиться собственным взглядом на стратегию разрешения данной проблемы.

Система факторов выбора комплектующих протеза

Одной из первых задач информационного обеспечения технологии персонализированного синтеза протеза нижней конечности является обоснование системы факторов, влияющих на требования к комплектующим протеза. Такую систему предлагается формировать в виде двух непересекающихся множеств: во-первых, базовых факторов P , указываемых в каталогах основных производителей протезной продукции и традиционно применяемых специалистами протезно-ортопедических предприятий при комплектации протеза; во-вторых, дополнительных факторов F :

$$P \cap F = \emptyset.$$

К множеству факторов P относятся: p_1 — тип протезирования (первичное/повторное), p_2 — уровень ампутации конечности, p_3 — целевое назначение протеза (для обычной жизнедеятельности, для занятий адаптивно-физической культурой и др.), p_4 — возрастная группа пациента (взрослый/ребенок), p_5 — пол (женский/мужской/унисекс), p_6 — масса тела, p_7 — размер сохранной стопы, p_8 — уровень двигательной активности. Оценка этих факторов производится методом клинического осмотра и опроса пациента, измерениями с помощью механических или электронных напольных весов и простых измерительных приспособлений. Поскольку уровень двигательной активности протезируемого p_8 определяется с помощью опросников, заполняемых со слов пациента [4, 5], то дополнительно к нему в разрабатываемой технологии предлагается проводить оценку уровня мобильных функций p_9 посредством предиктора мобильности, основанного на анализе результатов выполнения двигательных тестов на способность изменять и поддерживать положение тела, перемещать и манипулировать объектами, ходить и передвигаться без и с использованием протеза [7]. Результат оценки мобильных функций используется для повышения достоверности прогноза восстановления двигательной активности протезируемого. Если оценки p_8 и p_9 не соответствуют друг другу, то поднимается вопрос о корректировке первой из них.

Второе множество, F , разделено на четыре подгруппы однородных факторов:

— нарушение структур костно-мышечной системы и кожи нижней конечности (культи) и тазовой области;

— нарушение функций: нейромышечных, скелетных и связанных с движением (подвижности и стабильности суставов, мышечной силы и тонуса, моторно-рефлекторных и пр.), функций кожи, сенсорных функций (вестибулярных и зрения) и боли, функций сердечно-сосудистой и дыхательной систем, специфических умственных функций (внимания, памяти, эмоций и восприятия), сохранения массы тела и общих метаболических функций;

— оценка способности протезируемого к обучению и применению знаний, их реализации, особенности сфер деятельности, для осуществления которых планируется использовать изготавливаемый протез;

— особенности окружающей среды, в которой планируется использовать протез (обустроенность доступов к внутренним удобствам в здании проживания и в зданиях для общественного пользования; ландшафт в месте проживания пациента, наличие поддержки и взаимосвязи со стороны ближайших родственников и персонала, осуществляющих уход и оказывающих помощь).

В соответствии с Международной классификацией функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья (МКФ) (International Classification of Functioning, Disability and Health — ICF) эти группы факторов относятся к категориям ее составляющих: «*b*» — «функции организма», «*s*» — «структуры организма», «*d*» — «активность и участие», «*e*» — «факторы окружающей среды».

В МКФ модель здоровья человека представлена на основе интеграции медицинской и социальной субмоделей с использованием наборов взаимосвязанных категорий, отражающих состояние анатомических структур, физиологических функций, действий, задач и сфер жизнедеятельности индивида [12–14]. Формула кода категории в МКФ

$$\text{МКФ-код} = \text{префикс} + \text{шифр домена} + \\ + \text{определитель},$$

где префикс — обозначение составляющей (*b*, *s*, *d* или *e*), к которой относится домен МКФ, включающий категорию; шифр домена — числовой код для определения места категории в иерархии классификации разделов домена; определитель — числовой код оценки категории.

Например, умеренное нарушение вестибулярной функции передвижения кодируется как *b2352.2* (*b* — функции организма; *b2* — сенсорные функции и боль; *b235* — вестибулярные функции; *b2352* — вестибулярные функции передвижения; 2 после точки — умеренное нарушение).

Для всех факторов *F* может быть применена единая шкала оценки, используемая в МКФ: 0 — нет проблем (0–4 %); 1 — легкие (5–24 %); 2 — умеренные (25–49 %); 3 — тяжелые (50–95 %); 4 — абсолютные (96–100 %). Однако для разных составляющих оценка будет отражать различные аспекты: для *s* и *b* — нарушения, соответственно, структур или функций организма (нет нарушений, легкие, умеренные, тяжелые, абсолютные); для *d* — уровень реализации индивидуумом действия или капаситета, т. е. потенциальной способности его выполнить (нет затруднений, легкие, умеренные, тяжелые, абсолютные); для *e* — степень выраженности барьеров (0 — нет барьеров, –1 — незначительные, –2 — умеренные, –3 — выраженные, –4 — абсолютные) или облегчающих факторов (+0 — нет облегчающих факторов, +1 — незначительные, +2 — умеренные, +3 — выраженные, +4 — абсолютные).

Средства регистрации биомедицинской информации для выбора комплектующих протеза

Из всех этих составляющих (*b*, *s*, *d*, *e*) только *s* и *b* содержат категории, оценка которых требует применения инструментальных методов.

Что касается составляющей *s* (нарушения структур организма), то оценить нарушения относящихся к ней структур костно-мышечной системы, связанных с движением, можно методами клинического осмотра и измерениями с помощью простых приспособлений для измерения длин, обхватов, углов. Но для проведения измерений с одновременным автоматическим вводом результатов в электронную карту пациента и последующего использования их в алгоритмах выбора моделей могут быть применены электронные ростомер, рулетка, штангенциркуль и угломер. Кроме того, может потребоваться оцифровка рентгенограмм сканером, а для повышения наглядности и доказательности результатов обследования — фоторегистрация изображений фигуры пациента. Применение инструментальных методов еще более необходимо при оценке факторов, относящихся к категориям составляющей *b* (нарушение функций организма): для уточнения оценки нарушений нейромышечных, скелетных и связанных с движением функций — специализированные электронные динамометр и угломер; для оценки функций сердечно-сосудистой системы — электронные тонометр и шагомер, тепловизор; для оценки сенсорных функций — устройство оценки тактильной чувствительности кожных покровов; для измерения массы тела — электронные весы; при необходимости уточнения результатов клинической оценки уровня умственных функций — аппаратно-про-

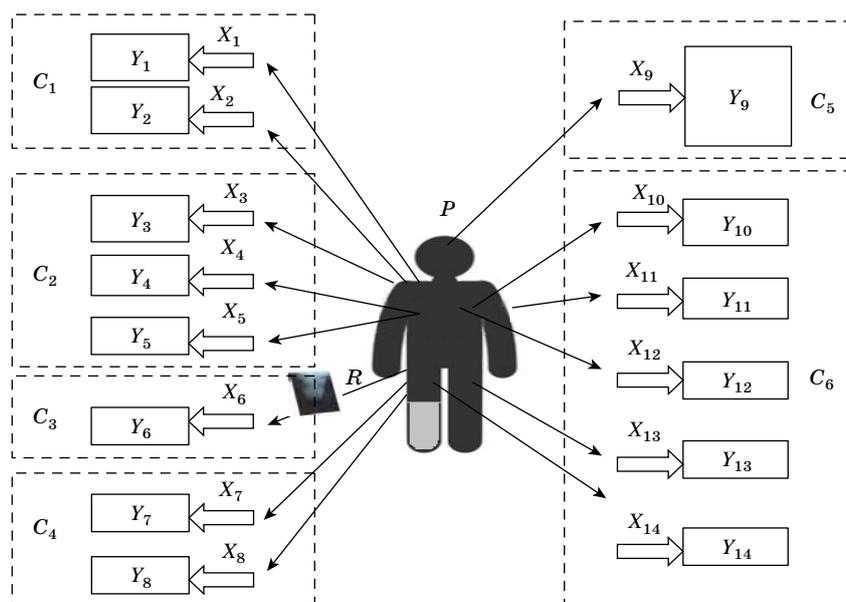
граммный комплекс (АПК) для исследования психофизиологического состояния пациента; для повышения доказательности результатов оценки структурных нарушений биокинематической цепи опорно-двигательного аппарата — стационарно установленный фотоаппарат или фотокомплекс с функцией управления от персонального ком-

пьютера, а для доказательности нарушения функций кожи и связанных с ней структур — мобильно используемый фотоаппарат. Перечень этих средств представлен в табл. 1, схема регистрации биомедицинской информации (БМИ) при инструментальном обследовании протезируемого — на рис. 1, где C_1 — ростомер со встроенными наполь-

■ **Таблица 1.** Измерительные средства для оценки структурно-функциональных нарушений организма протезируемого после ампутации нижней конечности

■ **Table 1.** Measuring tools for the assessment of body functions and structures impairment of the patient after lower limb amputation

| Обозначение | Наименование |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Y_1 | Электронные напольные весы (electronic floor scales) |
| Y_2 | Электронный ростомер (electronic stadiometer) |
| Y_3 | Электронная рулетка (electronic roulette) |
| Y_4 | Электронный штангенциркуль (electronic caliper) |
| Y_5 | Электронный угломер (electronic anglemeter) |
| Y_6 | Устройство оцифровки рентгенограмм (device for digitizing radiographs) |
| Y_7 | Фотоаппарат стационарно установленный (fixed-mounted camera for photography) |
| Y_8 | Фотоаппарат мобильного использования (camera for mobile use in photography) |
| Y_9 | Первичные преобразователи информации для оценки психофизиологического статуса (hardware and software complex for assessing the psychophysiological state of the patient) |
| Y_{10} | Электронный динамометр (electronic dynamometer) |
| Y_{11} | Устройство оценки тактильной чувствительности (device for assessing tactile sensitivity) |
| Y_{12} | Электронный тонометр (electronic tonometer) |
| Y_{13} | Электронный шагомер (electronic steps-telier) |
| Y_{14} | Тепловизор (termovision) |



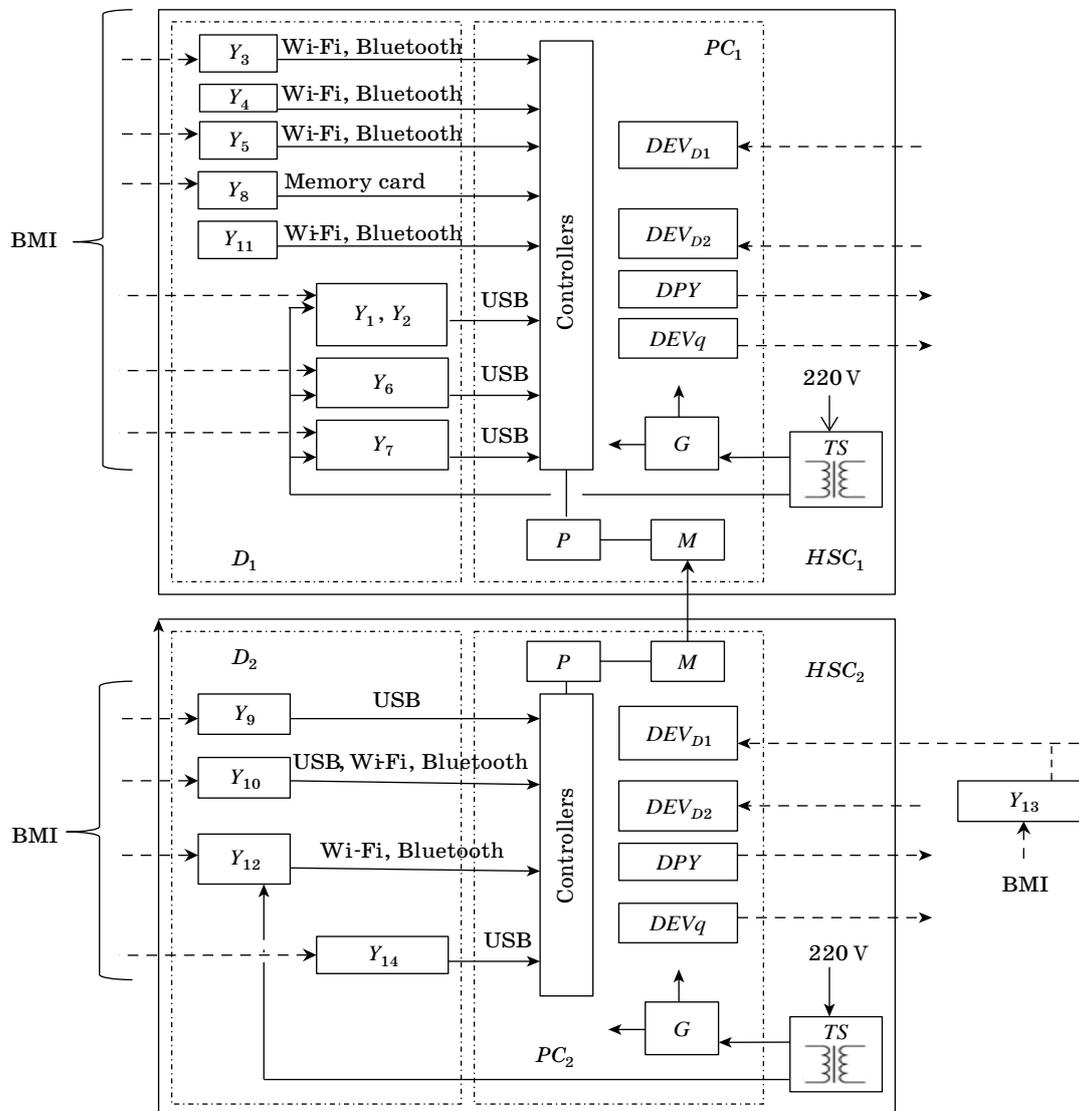
■ **Рис. 1.** Схема регистрации БМИ для оценки структурно-функциональных нарушений организма протезируемого

■ **Fig. 1.** Scheme of registration of biomedical information for the assessment of the body functions and structures impairment of the amputee

ными весами; C_2 — комплект электронных измерителей геометрических параметров фигуры человека; C_3 — оборудование для оцифровки и обработки рентгенограмм; C_4 — оборудование для стационарной фотосъемки; C_5 — АПК для оценки психофизиологического состояния пациента; C_6 — комплект оборудования для оценки реакции на физические нагрузки; P — пациент; R — рентгенограммы; X_1 — масса тела; X_2 — рост; X_3 — длиннотные и обхватные размеры фигуры пациента; X_4 — широтные размеры и диаметры фигуры пациента; X_5 — углы в суставах нижней конечности; X_6 — рентгенограммы; X_7 — изображения фигуры пациента; X_8 — изображения кожных дефектов культи; X_9 — психофизиологические ре-

акции пациента; X_{10} — механическая сила; X_{11} — реакция пациента на тактильное воздействие; X_{12} — артериальное давление и частота сердечных сокращений; X_{13} — количество шагов в тесте; X_{14} — инфракрасное излучение. Обозначения Y_i — в табл. 1.

Большинство из перечисленных измерительных средств включено в измерительно-информационную систему (ИИС) для использования врачом-ортопедом (при необходимости, с привлечением невропатолога) в целях повышения достоверности оценки нарушений структур костно-мышечной системы и кожи; нейромышечных, скелетных и связанных с движением функций; функций кожи и сенсорных функций. Их целе-



■ **Рис. 2.** Структура ИИС для регистрации BMI на этапе выбора моделей функциональных модулей протеза нижней конечности

■ **Fig. 2.** Structure of information-measuring system for registration of biomedical information at the stage of choosing functional modules models of lower limb prosthesis

сообразно объединить в единый АПК на рабочем месте врача-ортопеда. Другая часть измерительных средств должна быть объединена на рабочем месте, предоставляющем возможность проводить обследования другими профильными специалистами мультидисциплинарной реабилитационной бригады (терапевтом, а при необходимости — кардиологом, психотерапевтом, эндокринологом) при оценке функций сердечно-сосудистой и дыхательной систем, умственных функций, функций сохранения массы тела. Оба АПК объединены в единую систему с обменом информации между ними. Объем обследований определяется медико-технической комиссией в каждом случае протезирования.

Структура ИИС для регистрации БМИ на этапе выбора моделей функциональных модулей протеза нижней конечности представлена на рис. 2, где *BMI* — биомедицинская информация; *D* и *HSC* — комплект устройств регистрации БМИ и аппаратно-программный комплекс для рабочих мест (D_1 и HSC_1 — для врача-ортопеда/протезиста; D_2 и HSC_2 — для врача-терапевта/кардиолога/невропатолога/психотерапевта, при необходимости); DEV_{D1} — устройства ручного ввода информации; DEV_{D2} — устройство голосового ввода информации; DEV_q — устройства вывода информации; DPY — устройство отображения информации; *G* — блок питания; *M* — память; *P* — процессор; *PC* — персональный компьютер; *TS* — разделительный сетевой трансформатор.

Типы питания и типы каналов передачи информации с первичных преобразователей измерительных средств, указанные на рис. 2, выбраны исходя, во-первых, из требований обеспечения электробезопасности пациента при регистрации данных, во-вторых — из стремления к увеличению комфортности обследования для пациента и удобства его проведения для специалиста.

Из промышленно изготавливаемых комплектов протеза нижней конечности наиболее влияющими на результаты протезирования и наиболее сложными для персонифицированного выбора являются голенистоопный модуль (искусственная стопа), коленный и тазобедренный. Каждому из этих типов модулей будет соответствовать свой набор характеристик V_i . Например, характеристиками, учитываемыми при выборе голенистоопного модуля, будут: профиль стопы (низкий/нормальный); подвижность в определенных плоскостях и возможность ее регулировки; наличие функции микропроцессорного управления движением; уровень демпфирования переднего толчка и возможность его регулирования; упругость заднего толчка и возможность ее регулирования; уровень рекуперации энергии; рекомендуемый режим эксплуатации модуля (при обычной жизнедеятельности, для плавания

и пр.) и др. Кроме того, пациентом могут быть предъявлены персональные требования к эстетическим характеристикам протезного модуля, в частности, к цвету оболочки искусственной стопы, рельефу ее носка (например, отдельный большой палец или слитный с остальными).

Все эти характеристики должны быть отражены для каждой модели протезных модулей в электронном глобальном каталоге (с продукцией отечественных и зарубежных производителей), чтобы их можно было идентифицировать по принятой системе критериев в процессе выбора для комплектации протеза пациенту. К сожалению, на данный момент такого каталога не существует, и его формирование является одной из обязательных задач создания технологии персонифицированного синтеза протеза.

Правила выбора моделей комплектующих для синтеза модульного протеза

Правила выбора моделей основных функциональных модулей для комплектации протеза заключаются в следующем.

Согласно предлагаемому алгоритму выбора комплектующих, сначала для протезируемого пациента необходимо определить оценки множества основных факторов (*P*). Затем по их значениям должны с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) с заложенными в него правилами принятия решения автоматически определиться: вид протеза по уровню ампутации и назначению (например, протез голени модульный для купания); состав модулей в протезе (например, голенистооп, коленный модуль и т. п.); группа продукции по возрастному делению (для детей/взрослых), размер искусственной стопы; класс продукции по классификационной системе производителя с учетом массы тела и уровня двигательной активности пациента. Затем значениями множества дополнительных факторов (*F*) с помощью того же ПО уточняются требования к множеству *V* характеристик протезных модулей: их конструкционному исполнению, функциональным свойствам, эксплуатационным характеристикам. Собственно, совокупность этих характеристик и будет являться системой критериев выбора моделей протезных модулей.

В глобальном электронном каталоге протезных модулей должна содержаться база данных (БД) моделей протезных модулей, представляющая в структурированном виде информацию об этой продукции, с кодами характеристик для каждой модели, отражающими ее место в системе критериев выбора при синтезе модульного протеза. Система управления базой данных электронного глобального каталога должна по-

звolyть проводить фильтрацию представленных в ней объектов на нескольких уровнях.

Первый уровень фильтрации должен осуществляться автоматически при подгрузке в ПО ИИС значений основных факторов (P). В результате из исходной БД каталога моделей модулей должна автоматически сформироваться выборка БД_{*P*}, включающая только те модели, которые соответствуют факторам P .

Второй уровень автофильтрации должен происходить при подгрузке в ПО значений дополнительных факторов (F). Результатом фильтрации должно стать формирование из БД_{*P*} новой выборки БД_{*F*} с моделями, релевантными требованиям к функциональным, конструкционным и эксплуатационным характеристикам протеза, т. е. к оценкам факторов F . Для реализации такого режима в ПО ИИС должна быть заложена модель принятия решения, основанная на совокупной экспертной базе знаний о требованиях к характеристикам протезных модулей при различных оценках каждого из факторов F . База знаний может быть представлена в матричной форме. Такая форма представления знаний лаконична и интуитивно понятна, что имеет большое значение для практических специалистов в области медицинской реабилитации (табл. 2, где s_1, \dots, s_k — показатели состояния структур организма; b_1, \dots, b_l — функций организма; d_1, \dots, d_m — активности и участия пациента; e_1, \dots, e_n — факторов окружающей среды; характеристики голеностопного $x_{г1}, \dots, x_{гp}$, коленного $x_{к1}, \dots, x_{кq}$, тазобедренного $x_{т1}, \dots, x_{тр}$ протезных модулей).

В качестве примера в табл. 3 представлен фрагмент матричной модели для фильтрации моделей голеностопных модулей.

Обозначения в заголовках столбцов: $b710$ — подвижность сустава и $b715$ — стабильность сустава (КС — коленного, ТБС — тазобедренного); $b7500$ — двигательный рефлекс растяжения, $b7501$ — рефлекс на повреждающий стимул, $b755$ — функция произвольной двигательной реакции, $b7600$ — контроль простых произвольных движений, $b7601$ — контроль сложных

произвольных движений, $b7602$ — координация произвольных движений, $b7603$ — опорные функции руки или ноги, $b7650$ — произвольные сокращения мышц, $b7653$ — стереотипные и двигательные персеверации; 0 — нет нарушений функции, 1 — легкие, 2 — умеренные, 3 — тяжелые, 4 — абсолютные.

Обозначения в заголовках строк: X_1 — подвижность стопы при перекате (0 — отсутствует, 1 — только в сагиттальной плоскости, 2 — в сагиттальной и фронтальной плоскостях, 3 — в трех плоскостях); X_2 — регулировка подвижности стопы (0 — невозможна, 1 — только в сагиттальной плоскости, 2 — в сагиттальной и фронтальной плоскостях, 3 — в трех плоскостях); X_3 — микропроцессорное управление движением стопы (0 — отсутствует, 1 — имеется); X_4 — демпфирование переднего толчка (1 — сниженное — «жесткая пятка», 2 — среднее, 3 — повышенное — «мягкая пятка», 4 — регулируемое); X_5 — упругость заднего толчка (1 — низкая — «мягкий носок», 2 — средняя, 3 — повышенная — «жесткий носок», 4 — регулируемая); X_6 — рекуперация энергии (1 — слабая, 2 — нормальная, 3 — повышенная).

Обозначения на пересечении строк и столбцов: N — не рекомендуется, A — допускается, R — рекомендуется.

Таким образом, после фильтрации второго уровня в БД_{*F*} должны остаться только модели с оценками R — рекомендуется и A — допускается по каждому из критериев, учитываемых в базе знаний.

На третьем уровне фильтрации должен быть организован режим анализа совместимости моделей модулей по типам дистального и проксимального соединения их в едином протезе. Модель удаляется из БД_{*F*}, если отсутствуют совместимые с ней модели нужного типа соединения для возможности объединения их как звеньев единой кинематической цепи протеза. Таким образом получается БД'_{*F*}.

Затем протезируемому предлагается указать приоритеты персональных требований к характеристикам модулей. Для организации этого

■ **Таблица 2.** Матричная форма представления базы знаний для выбора моделей функциональных модулей протеза по соответствию их характеристик X оценкам дополнительных факторов F

■ **Table 2.** The matrix form of the knowledge base representation for the selection of functional modules of prosthesis models according to the correspondence of their characteristics X to the estimates of additional factors F

| X | F | | | |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | s_1, \dots, s_k | b_1, \dots, b_l | d_1, \dots, d_m | e_1, \dots, e_n |
| | Область оценок факторов по шкале МКФ | | | |
| $x_{г1}, \dots, x_{гp}$ | Область оценок соответствия между значениями факторов F и характеристик X (варианты оценок: не рекомендуется, допускается, рекомендуется) | | | |
| $x_{к1}, \dots, x_{кq}$ | | | | |
| $x_{т1}, \dots, x_{тр}$ | | | | |

■ **Таблица 3.** Фрагмент базы знаний для фильтрации моделей голеностопных модулей с учетом состояния нейромускульных, скелетных и связанных с движением функций
 ■ **Table 3.** Fragment of the knowledge base for selection models of ankle modules, taking into account the state of neuromusculoskeletal and movement-related functions

| Функциональные характеристики искусственной стопы | | Показатели и варианты оценок нейромускульных, скелетных и связанных с движением функций организма | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|------|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|--------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | b710 | | | | | | | | | | b715 | | | | | | | | | | b7500, b7501, b755, b7600, b7601, b7602, b7603, b7650, b7653 | | | | | | | | | |
| Обозначение | Варианты оценок | КС | | | | | ТБС | | | | | КС | | | | | ТБС | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | |
| X ₁ | 0 | A | A | N | N | N | | | | | | A | A | A | R | R | | | | | | | | | | | A | A | A | R | R |
| | 1 | A | R | R | R | R | | | | | | A | A | A | N | N | | | | | | | | | | | A | A | A | A | A |
| | 2 | A | A | N | N | N | | | | | | A | A | A | N | N | | | | | | | | | | | A | A | A | N | N |
| | 3 | A | A | N | N | N | | | | | | A | A | A | N | N | | | | | | | | | | | A | A | A | N | N |
| X ₂ | 0 | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | A | A | A | N | N | A | A | A | A | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X ₃ | 0 | | | | | | | | | | | A | A | A | A | R | A | A | A | A | R | A | A | A | A | R | A | A | A | R | R |
| | 1 | | | | | | | | | | | A | A | A | R | N | A | A | A | R | N | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N |
| X ₄ | 1 | A | A | R | R | R | | | | | | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N |
| | 2 | A | A | A | A | A | | | | | | A | A | A | A | N | A | A | A | A | N | A | A | A | A | N | A | A | A | A | N |
| | 3 | A | A | N | N | N | | | | | | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A |
| | 4 | A | A | A | N | N | | | | | | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N |
| X ₅ | 1 | A | A | N | N | N | A | A | R | R | R | R | R | A | N | N | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N | R | R | A | N | N |
| | 2 | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A | A |
| | 3 | A | A | R | R | R | A | A | N | N | N | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N | A | A | A | N | N | A | A | A | A | A |
| | 4 | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R | R |
| X ₆ | 1 | | | | | | | | | | | A | A | A | R | R | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | | | A | A | A | N | N | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | | A | A | A | N | N | | | | | | | | | | | | | | | |

режима в ПО ИИС должен быть перечень допустимых для выбора пациентом характеристик (в основном эстетических) некоторых типов модулей. В результате моделям в БД_Ф присваиваются оценки по критерию удовлетворенности пациента, например по пятибалльной шкале.

Если в выборке БД_Ф окажется для какого-либо типа модулей более чем одна модель, тогда специалисту придется решать задачу многокритериальной оптимизации с иерархической критериальной структурой [15].

В последние годы для решения подобных задач наиболее часто в различных областях деятельности применяется метод анализа иерархий [16–18]. Преимуществом этого метода является то, что, в отличие от классических многокритериальных методов принятия решения, он представляет специалисту структурированный подход к оценке стратегий в условиях неопределенности и позволяет учитывать все факторы, которые имеют отношение к ситуации принятия решения — как объективные, так и субъективные. Однако ограничением применения этого метода для поставленной задачи выбора комплектующих протеза является большое количество альтернатив на трех уровнях иерархии (факторов, характеристик и объектов выбора), учитываемых в модели принятия решения. Более того, появились работы в области математических наук, в которых метод подвергается критике [19, 20]. Их автор утверждает, что ошибочным допущением в методе является то, что шкалы, в которых

риальных методов принятия решения, он представляет специалисту структурированный подход к оценке стратегий в условиях неопределенности и позволяет учитывать все факторы, которые имеют отношение к ситуации принятия решения — как объективные, так и субъективные. Однако ограничением применения этого метода для поставленной задачи выбора комплектующих протеза является большое количество альтернатив на трех уровнях иерархии (факторов, характеристик и объектов выбора), учитываемых в модели принятия решения. Более того, появились работы в области математических наук, в которых метод подвергается критике [19, 20]. Их автор утверждает, что ошибочным допущением в методе является то, что шкалы, в которых

осуществляется оценивание степеней предпочтения альтернатив по каждому из критериев, считаются автором метода иерархий (Т. Л. Saaty) не связанными между собой шкалами отношений, тогда как это допущение в свете математической теории измерений неправомерно.

Специалист может воспользоваться также и другими вариантами принятия решения исходя из ситуационной расстановки приоритетов. Таким решением может быть выбор модели, которая набрала большее количество баллов за соответствие ее характеристик рекомендациям, изложенным в базе знаний (см. табл. 2). Например, если какая-либо характеристика модели рекомендуется для имеющейся оценки фактора F , то ей присваивается 2 балла, а если только допускается — 1 балл (модели с nereкомендуемыми характеристиками отсутствуют в БД $_F$ — удалены из нее при фильтрации). Полученные для каждой характеристики баллы складываются. В ПО ИИС должен быть обеспечен режим автоматического выполнения такого расчета. Другим вариантом решения является выбор наиболее дешевой модели из представленных в БД $_F$, т. е. из рекомендуемых и допускаемых для комплектации протеза при полученных оценках факторов F .

Также в ПО ИИС для персонифицированного выбора протезных модулей целесообразно организовать режим виртуальной сборки протеза в виде отображения на экране условного изображения выбранных моделей, соединенных между собой в единую конструкцию.

Заключение

Использование возможностей компьютерных технологий для обеспечения обоснованного персонифицированного выбора моделей основных функциональных модулей протеза является необходимым условием для повышения уровня реабилитации людей с ампутационными дефектами нижних конечностей и качества их жизни.

Автоматизация процесса обследования протезируемого и процедуры выбора комплектующих позволит избежать проблем увеличения временных затрат специалистов мультидисциплинарной реабилитационной бригады на регистрацию, обработку и анализ того большого объема БМИ, который необходим для повышения качества выбора комплектующих протеза в соответствии с предложенной технологией персонифицированного синтеза модульного протеза. Более того, такое увеличение трудовых и технических (оснащение рабочих мест информационно-измерительным оборудованием) ресурсов на этапе начала протезирования — при комплектации протеза — снизит риск ошибок протезирования, устранение которых в отдаленные сроки значительно сложнее в организационном плане и более затратно в экономическом.

Результаты работы являются шагом по пути создания технологии компьютеризированного многокритериального выбора комплектующих модульного протеза нижней конечности с учетом персональных потребностей и функциональных возможностей пациента.

Литература

1. Ziegler-Graham K., MacKenzie E., Ephraim P., Travison T., Brookmeyer R. Estimating the prevalence of limb loss in the United States: 2005 to 2050. *Physical Medicine and Rehabilitation*, 2008, vol. 89, no. 3, pp. 422–429. doi:10.1016/j.apmr.2007.11.005
2. Классификационная система MOBIS. <https://www.ottobock.ru/prosthetics/info-for-new-amputees/mobis-system> (дата обращения: 03.09.2021).
3. Модули и узлы протезов голени для взрослых. <https://www.energia.ru/ru/conversion/prosthetic/pnk/pnk-02.html> (дата обращения 03.09.2021).
4. Sansam K., Neumann V., O'Connor R., Bhakta B. Predicting walking ability following lower limb amputation: a systematic review of the literature. *Rehabil Med.*, 2009, vol. 41, no. 8, pp. 593–603. doi:10.2340/16501977-0393
5. Kahle J., Highsmith M., Schaepper H., Johannesson A., Orendurff M., Kaufman K. Predicting walking ability following lower limb amputation: an updated systematic literature review. *Technol Innov.*, 2016, vol. 18, no. 2-3, pp. 125–137. doi:10.21300/18.2-3.2016.125
6. Gailey R. S. Predictive outcome measures versus functional outcome measures in the lower limb amputee. *J. P. O.*, 2006, vol. 18, pp. 51–60. doi.org/10.1097/00008526-200601001-00006
7. Gailey R. S., Roach K. E., Applegate E. B., Cho B., Cunniffe B., Licht S., Maguire M., Nash M. The amputee mobility predictor: an instrument to assess determinants of the lower-limb amputee's ability to ambulate. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 2002, vol. 83, no. 5, pp. 613–627. doi:10.1053/ampr.2002.32309
8. Васильченко Е. М., Хохлова О. И., Карапетян К. К., Денисова Я. А. К вопросу выбора технических средств реабилитации для инвалидов с утратой нижней конечности. *Материалы IV Междунар. конгр. «Современные технологии и оборудование для медицинской реабилитации, санаторно-курортного лечения и спортивной медицины» VITA REHAB WEEK.*, Екатеринбург, 13–14 октября. 2020 г.; Челябинск, Уральская академия, 2020, с. 22–26. https://uralgufk.ru/sites/default/files/news/files/2020_kongress_0.pdf (дата обращения: 03.09.2021).
9. Colombo G., Facoetti G., Rizzi C. A digital patient for computer-aided prosthesis design. *Interface Focus*,

- 2013, vol. 3, no. 2, Article 20120082. doi:10.1098/rsfs.2012.0082
10. Colombo G., Cabbiadini S., Regazzoni D., Rizzi C. Design procedure and rules to configure lower limb prosthesis. *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE*, 2011 August 28–31, 2011, Washington, DC, US, vol. 2, pp. 673–681. doi.org/10.1115/DETC2011-47651
 11. Smirnova L. M., Makarov K. M., Skrebekov E. A., Monakhova M. I. A web app for personalized assembly of lower-limb modular prostheses. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 2, pp. 134–138. doi:10.1007/s10527-021-10087-x
 12. *ICF based documentation form*. <http://www.icf-coresets.org/e№/page1.php> (дата обращения: 03.09.2021).
 13. Rauch A., Cieza A., Stucki G. How to apply the International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF) for rehabilitation management in clinical practice. *Eur J Phys Rehabil Med.*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 329–342. https://www.researchgate.net/publication/23229007_How_to_apply_the_International_Classification_of_Functioning_Disability_and_Health_ICF_for_rehabilitation_management_in_clinical_practice (дата обращения: 03.09.2021).
 14. Шошмин А. В., Пономаренко Г. Н., Бесстрашнова Я. К., Черкашина И. В. Применение Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья для оценки эффективности реабилитации: методология, практика, результаты. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*, 2016, № 6, с. 12–20. doi:10.17116/kurort2016612-20
 15. Smirnova L. M., Skrebekov E. A. Software implementation of the analytic hierarchy process method to justify the plan of biomechanical examination of patients with a prosthesis. *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON 2019)*, 2019, pp. 631–635. doi:10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958321
 16. Saaty T. L. *The analytic hierarchy process*. N.Y., McGraw Hill, 1980. 288 p.
 17. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 83–98.
 18. Vaidia J. S., Kumar S. Analytic hierarchy process: an overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 2006. vol. 168, pp. 1–29.
 19. Подиновский В. В., Подиновская О. В. О некорректности метода анализа иерархий. *Проблемы управления*, 2011, вып. 1, с. 8–13. <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekorrektnosti-metoda-analiza-ierarhiy/viewer> (дата обращения: 03.09.2021).
 20. Подиновский В. В. *Основные направления развития теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений*. Сб. тр. «Современные проблемы информатизации в экономике и обеспечении безопасности»/под ред. О. Я. Кравцова. Воронеж, Научная книга, 2009. Вып. 14. С. 72–74.

UDC 004.9; 616-71; 617.58-77; 615.471
doi:10.31799/1684-8853-2021-6-64-74

Methodology and information-measuring system for personalized synthesis of lower limb prostheses

L. M. Smirnova^{a,b}, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-4373-9342, info@diaserv.ru

G. N. Ponomarenko^{b,c}, Dr. Sc., Med., Professor, orcid.org/0000-0001-7853-4473

V. G. Suslyayev^b, PhD, Med., Leading Researcher, orcid.org/0000-0003-0651-5497

^aSaint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Professor Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bFederal Scientific Center of Rehabilitation of the Disabled named after G. A. Albrecht, 50, Bestuzhevskaya St., 195067, Saint-Petersburg, Russian Federation

^cNorth-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, 41, Kirochnaya St., 191015, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: One of the methods for managing the quality of prosthetics is optimizing the composition of a modular prosthesis components. Mistakes in choosing models for functional modules of a prosthesis lead to a limited realization of the patient's potential capabilities, or to the choice of expensive highly functional models whose potential cannot be fully realized with the given body system disabilities. One of the most effective ways to solve this problem is to use the computer technology capabilities. **Purpose:** Substantiation of the methodology for the development of an innovative computer technology for personalized synthesis of a lower-limb prosthesis, including the development of the structure of an information-measuring system for its implementation. **Methods:** Analysis, synthesis, analogy; expert survey; analytic hierarchy process (Saaty method). The conceptual language of the International Classification of Functioning, Disability and Health was used to describe the factors influencing the requirements for the characteristics of prosthetic modules. **Results:** In order to choose models for prosthetic modules, we should use an extended system of factors, including both the basic factors associated with the purpose of the products and indicated in the catalogs, and additional factors: impairment indicators of the body functions and structures, the capacity and performance of the patient's activity and participation, the presence of barriers and facilitators environmental factors in which the prosthesis is planned to be used. Taking this system of factors into account, a structural diagram of an information-measuring system for examining a prosthetic patient has been developed. To select the components for the prosthesis, we have substantiated the necessity of creating a global electronic catalog, combining structured information on the models of prosthetic modules supplied by various manufacturers. A matrix representation form is proposed for the knowledge base, reflecting

the rules for choosing models according to the correspondence of their characteristics to the estimates of the factors. The methodology of computerized selection of models from the electronic catalog has been substantiated. **Practical relevance:** The results of the work are a step towards the creation of a technology for a computerized multicriteria choice of components for a modular prosthesis, taking into account the personal needs and functional capabilities of the patient. The use of this technology will improve the patient's rehabilitation level and the quality of his or her life.

Keywords — information-measuring medical system, prosthesis synthesis, prosthesis quality control, multicriteria choice, knowledge base, medical rehabilitation.

For citation: Smirnova L. M., Ponomarenko G. N., Suslyayev V. G. Methodology and information-measuring system for personalized synthesis of lower limb prostheses. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 64–74 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2021-6-64-74

References

- Ziegler-Graham K., MacKenzie E., Ephraim P., Travison T., Brookmeyer R. Estimating the prevalence of limb loss in the United States: 2005 to 2050. *Physical Medicine and Rehabilitation*, 2008, vol. 89, no. 3, pp. 422–429. doi:10.1016/j.apmr.2007.11.005
- Klassifikatsionnaya sistema MOBIS* [MOBIS classification system]. Available at: <https://www.otobock.ru/prosthetics/info-for-new-amputees/mobis-system> (accessed 3 September 2021).
- Moduli i uzly protezov goleni dlya vzroslykh* [Modules and assemblies of lower leg prostheses for adults]. Available at: <https://www.energia.ru/ru/conversion/prosthetic/pnk/pnk-02.html> (accessed 3 September 2021).
- Sansam K., Neumann V., O'Connor R., Bhakta B. Predicting walking ability following lower limb amputation: a systematic review of the literature. *Rehabil Med.*, 2009, vol. 41, no. 8, pp. 593–603. doi:10.2340/16501977-0393
- Kahle J., Highsmith M., Schaepper H., Johannesson A., Orendurff M., Kaufman K. Predicting walking ability following lower limb amputation: an updated systematic literature review. *Technol Innov.*, 2016, vol. 18, no. 2–3, pp. 125–137. doi:10.21300/18.2-3.2016.125
- Gailey R. S. Predictive outcome measures versus functional outcome measures in the lower limb amputee. *J. P. O.*, 2006, vol. 18, pp. 51–60. doi.org/10.1097/00008526-200601001-00006
- Gailey R. S., Roach K. E., Applegate E. B., Cho B., Cunniffe B., Licht S., Maguire M., Nash M. The amputee mobility predictor: an instrument to assess determinants of the lower-limb amputee's ability to ambulate. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 2002, vol. 83, no. 5, pp. 613–627. doi:10.1053/ampr.2002.32309
- Vasil'chenko E. M., Khokhlova O. I., Karapetyan K. K., Denisova Ya. A. On the issue of choosing technical means of rehabilitation for people with disabilities with the loss of a lower limb. *Proceedings of the IV Int. Congr. "Modern technologies and equipment for medical rehabilitation, sanatorium treatment and sports medicine" VITA REHAB WEEK*, Ekaterinburg, October 13–14, 2020, Chelyabinsk, Ural'skaya akademiya Publ., 2020, pp. 22–26. Available at: https://uralgufk.ru/sites/default/files/news/files/2020_kongress_0.pdf (accessed 3 September 2021) (In Russian).
- Colombo G., Facoetti G., Rizzi C. A digital patient for computer-aided prosthesis design. *Interface Focus*, 2013, vol. 3, no. 2, Article 20120082. doi:10.1098/rsfs.2012.0082
- Colombo G., Cabbiadini S., Regazzoni D., Rizzi C. Design procedure and rules to configure lower limb prosthesis. *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE*, 2011 August 28–31, 2011, Washington, DC, US, vol. 2, pp. 673–681. doi.org/10.1115/DETC2011-47651
- Smirnova L. M., Makarov K. M., Skrebenkov E. A., Monakhova M. I. A web app for personalized assembly of lower-limb modular prostheses. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 2, pp. 134–138. doi:10.1007/s10527-021-10087-x
- ICF based documentation form*. <http://www.icf-core-sets.org/e№/page1.php> (accessed 3 September 2021).
- Rauch A., Cieza A., Stucki G. How to apply the International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF) for rehabilitation management in clinical practice. *Eur J Phys Rehabil Med.*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 329–342. https://www.researchgate.net/publication/23229007_How_to_apply_the_International_Classification_of_Functioning_Disability_and_Health_ICF_for_rehabilitation_management_in_clinical_practice (accessed 3 September 2021).
- Shoshmin A. V., Ponomarenko G. N., Besstrashnova Ya. K., Cherkashina I. V. The application of the International classification of functioning, disability and health for the evaluation of the effectiveness of rehabilitation: methodology, practical experience, results. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury*, 2016, no. 6, pp. 12–20. doi: 10.17116/kurort2016612-20 (In Russian).
- Smirnova L. M., Skrebenkov E. A. Software implementation of the analytic hierarchy process method to justify the plan of biomechanical examination of patients with a prosthesis. *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON 2019)*, 2019, pp. 631–635. doi:10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958321
- Saaty T. L. *The analytic hierarchy process*. N.Y., McGraw Hill, 1980. 288 p.
- Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 83–98.
- Vaidia J. S., Kumar S. Analytic hierarchy process: an overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 168, pp. 1–29.
- Podinovskii V. V., Podinovskaya O. V. On the incorrectness of the hierarchy analysis method. *Control Sciences*, 2011, no. 1, pp. 8–13. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-nekorrektnosti-metoda-analiza-ierarhiy/viewer> (accessed 3 September 2021) (In Russian).
- Podinovskii V. V. *Osnovnye napravleniya razvitiya teorii vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nykh zadachah prinyatiya reshenij* [The main development directions for the criteria-importance-theory in multicriteria decision-making tasks. In: Collection of works "Modern problems of informatization in economics and security"]. Eds. O. J. Kravtsov. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2009. Iss. 14. Pp. 72–74 (In Russian).

АКСЁНОВ
Александр
Александрович



Младший научный сотрудник лаборатории речевых и мультимедийных интерфейсов Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН. В 2019 году окончил магистратуру Университета ИТМО по специальности «Программная инженерия».

Является автором 15 научных публикаций и одного патента на изобретения.

Область научных интересов — компьютерное зрение, человеко-машинное взаимодействие, аудиовизуальное распознавание речи, машинное обучение.

Эл. адрес:
axyonov.a@iias.spb.ru

АНАНЬЕВСКИЙ
Михаил
Сергеевич



Доцент кафедры теоретической кибернетики Санкт-Петербургского государственного университета, старший научный сотрудник лаборатории управления сложными системами Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург.

В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Прикладная математика».

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором 32 научных публикаций.

Область научных интересов — математическая теория управления, математические вопросы машинного обучения.

Эл. адрес: msairme@yandex.ru

БАТЕНКОВ
Александр
Александрович



Профессор Орловского государственного университета им. И. С. Тургенева.

В 1979 году окончил Киевское высшее военное дважды Краснознаменное училище связи им. М. И. Калинина по специальности «Радиосвязь, радиовещание и телевидение».

В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 110 научных публикаций и 10 патентов на изобретения.

Область научных интересов — статистическая теория связи, модели и методы обработки сигналов, вычислительные алгоритмы.

Эл. адрес: batenkov1957@mail.ru

БАТЕНКОВ
Кирилл
Александрович



Доцент, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел.

В 2003 году окончил Академию Федерального агентства правительственной связи и информации при Президенте Российской Федерации по специальности «Сети связи и системы коммутации».

В 2016 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 174 научных публикаций и 20 патентов на изобретения.

Область научных интересов — статистическая теория связи, модели и методы обработки сигналов, анализ качества сетей связи.

Эл. адрес: pustur@yandex.ru

БОГДАНОВ
Павел
Юрьевич



Старший преподаватель кафедры технологий защиты информации Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2012 году окончил Российский государственный гидрометеорологический университет по специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

Является автором 20 научных публикаций.

Область научных интересов — защищенные телекоммуникационные системы, интернет вещей, технологии защиты информации.

Эл. адрес:
45bogdanov@gmail.com

ВАСИЛЬЕВ
Николай
Николаевич



Старший научный сотрудник лаборатории теории представлений и динамических систем Санкт-Петербургского отделения Математического института им. В. А. Стеклова РАН.

В 1975 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета по специальности «Алгебра и теория чисел».

В 1990 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором более 120 научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерная алгебра, вычислительная алгебраическая геометрия и коммутативная алгебра, теория динамических систем, небесная механика.

Эл. адрес: vasiliev@pdmi.ras.ru

ДУЖИН
Василий
Сергеевич



Старший преподаватель кафедры алгоритмической математики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2020 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором 23 научных публикаций. Область научных интересов — компьютерная алгебра, компьютерное моделирование, дискретная математика. Эл. адрес: vsduzhin@etu.ru

КУЗЬМИН
Артем
Дмитриевич



Магистрант факультета компьютерных технологий и информатики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Является автором четырех научных публикаций. Область научных интересов — компьютерная алгебра, компьютерное моделирование, дискретная математика. Эл. адрес: aradin99@gmail.com

КАГИРОВ
Ильдар
Амирович



Научный сотрудник лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН. В 2008 году окончил филологический факультет Санкт-Петербургского государственного университета по специальности «Лингвистика». Является автором более 30 научных публикаций и одного патента на изобретения. Область научных интересов — лингвистика жестовых языков, человеко-машинное взаимодействие, синтаксис и грамматическая семантика естественных языков, корпусная лингвистика. Эл. адрес: kagirov@iias.spb.su

КАРПОВ
Алексей
Анатольевич



Главный научный сотрудник, руководитель лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН. В 2002 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 350 научных публикаций, включая четыре монографии и пять патентов. Область научных интересов — многомодальные интерфейсы и системы, речевые технологии, автоматическое распознавание и синтез речи, компьютерная паралингвистика. Эл. адрес: karpov@iias.spb.su

КОРНЕЕВА
Инна
Павловна



Магистрант, инженер кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2020 году с отличием окончила бакалавриат Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» по специальности «Биотехнические системы и технологии». Является автором восьми научных публикаций. Область научных интересов — медицинское приборостроение, системы удаленного мониторинга. Эл. адрес: korneeva.inkorn@yandex.ru

КРАМАРЬ
Кристина
Алексеевна



Магистрант, инженер кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2020 году с отличием окончила бакалавриат Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» по специальности «Биотехнические системы и технологии». Является автором восьми научных публикаций. Область научных интересов — анализ биомедицинских данных, системы удаленного мониторинга. Эл. адрес: k.kramar@gmail.com

**ПОНОМАРЕНКО
Геннадий
Николаевич**



Профессор, генеральный директор Федерального научного центра реабилитации инвалидов им. Г. А. Альбрехта, Санкт-Петербург.

В 1983 году окончил Военно-медицинскую академию им. С. М. Кирова, в 1988 году — физический факультет Ленинградского государственного университета, в 2000 г. — Северо-Западную академию государственной службы по специальности «Государственное и муниципальное управление».

В 1993 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора медицинских наук.

Является автором 900 научных публикаций, 10 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Область научных интересов — реабилитация.

Эл. адрес: ponomarenko_g@mail.ru

**РЮМИН
Дмитрий
Александрович**



Старший научный сотрудник лаборатории речевых и мультимедийных интерфейсов Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН.

В 2016 году окончил магистратуру университета ИТМО по специальности «Речевые информационные системы».

В 2020 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 41 научной публикации и трех патентов на изобретения.

Область научных интересов — машинный сурдоперевод, распознавание образов, человеко-машинные интерфейсы, много-модальные интерфейсы, цифровая обработка изображений, машинное обучение, нейронные сети, биометрия.

Эл. адрес: ryumin.d@iias.spb.su

**СВЕНЦИЦКАЯ
Татьяна
Алексеевна**



Доцент кафедры математики Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 1976 году окончила Ленинградский педагогический институт им. А. И. Герцена по специальности «Учитель математики и программирования».

В 1984 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором более 30 научных публикаций.

Область научных интересов — теория многозначных отображений, дискретная математика.

Эл. адрес: sventsitskaya@mail.ru

**СЕМЕНОВА
Евгения
Анатовна**



Доцент, заместитель заведующего кафедрой биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

В 2010 году окончила магистратуру Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» по специальности «Биомедицинская инженерия».

В 2016 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 50 научных публикаций.

Область научных интересов — биотехнические системы медицинского назначения, медицинское приборостроение, системы удаленного мониторинга состояния здоровья.

Эл. адрес: easemenova@etu.ru

**СЕРГЕЕВ
Александр
Михайлович**



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

В 2020 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 35 научных публикаций.

Область научных интересов — численные методы, теория вычислительных процессов, проектирование специализированных процессоров.

Эл. адрес: asklab@mail.ru

**СИТЧИХИНА
Мария
Сергеевна**



Студентка математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Область научных интересов — теоретическая кибернетика, математическое моделирование, машинное обучение.

Эл. адрес: sitchmaria@gmail.com

СМИРНОВА
Людмила
Михайловна



Профессор кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», ведущий научный сотрудник Федерального научного центра реабилитации инвалидов им. Г. А. Альбрехта, Санкт-Петербург.
В 1980 году окончила Ленинградский кораблестроительный институт по специальности «Инженер-механик».
В 2011 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором 300 научных публикаций.
Область научных интересов — разработка инструментальных компьютерных методов и медицинской техники для биомеханических исследований состояния опорно-двигательного аппарата и др.
Эл. адрес: info@diaserv.ru

ТАТАРНИКОВА
Татьяна
Михайловна



Профессор кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
В 1993 году окончила Восточно-Сибирский технологический институт по специальности «Электронно-вычислительные машины, комплексы, системы и сети».
В 2007 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 100 научных публикаций.
Область научных интересов — инфокоммуникации, взаимодействие неоднородных сетей.
Эл. адрес: tm-tatarn@yandex.ru

ФОКИН
Александр
Борисович



Сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел.
В 2004 году окончил Академию спецсвязи ФСО России по специальности «Сети связи и системы коммутации».
Является автором 12 научных публикаций и двух патентов на изобретения.
Область научных интересов — анализ качества сетей связи.
Эл. адрес: tatarin57ru@mail.ru

СУСЛЯЕВ
Вадим
Геннадьевич



Доцент, ведущий научный сотрудник Института протезирования и ортезирования Федерального научного центра реабилитации инвалидов им. Г. А. Альбрехта, Санкт-Петербург.
В 1987 году окончил Куйбышевский медицинский институт им. Д. И. Ульянова по специальности «Лечебное дело».
В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук.
Является автором 150 научных публикаций, десяти монографий и трех авторских свидетельств на изобретения.
Область научных интересов — травматология и ортопедия, физическая и реабилитационная медицина, технические средства реабилитации, протезирование и ортезирование конечностей.
Эл. адрес: vadims1964@yandex.ru

ТОМЧИН
Дмитрий
Александрович



Научный сотрудник лаборатории управления сложными системами Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург.
В 2000 году окончил факультет электротехники и автоматизации Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».
В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором более 20 научных публикаций.
Область научных интересов — мехатроника, математическое моделирование, алгоритмы управления вибрационными установками.
Эл. адрес: dtomchin@yandex.ru

ФРАДКОВ
Александр
Львович



Заведующий лабораторией управления сложными системами Института проблем машиноведения РАН, профессор Санкт-Петербургского государственного университета.
В 1971 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета.
В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 700 научных публикаций, в том числе десяти патентов и 17 монографий.
Область научных интересов — нелинейное и адаптивное управление, математическое моделирование, искусственный интеллект в киберфизических системах и др.
Эл. адрес: fradkov@mail.ru

ЮЛДАШЕВ
Зафар
Мухамедович



Профессор, заведующий кафедрой биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», почетный работник высшего профессионального образования.

В 1978 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Электронно-медицинская аппаратура».

В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 200 научных публикаций и 17 патентов на изобретения.

Область научных интересов — биотехнические системы медицинского назначения, медицинское приборостроение, системы удаленного мониторинга состояния здоровья.

Эл. адрес: zmyuldashev@etu.ru

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» ЗА 2021 г. [№ 1–6]

| | № | Стр. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|------|
| Afanasev A. A., Biktimirov S. N. CubeSat formation architecture for small space debris surveillance and orbit determination | 4 | 37 |
| Balonin Yu. N., Sergeev A. M., Vostrikov A. A. The rise in maximum determinant matrix complexity | 3 | 2 |
| Balonin N. A., Đokovic D. Ž. Three new lengths for cyclic Legendre pairs | 1 | 2 |
| Burkov A. A. Signal power and energy-per-bit optimization problems in mMTC systems | 5 | 51 |
| Cong Thang Pham, Thi Thu Thao Tran, Minh Tuan Pham, Thanh Cong Nguyen. Combined total variation of first and fractional orders for Poisson noise removal in digital images | 5 | 10 |
| Fomin V. V., Aleksandrov I. V. Indexing algorithm based on storing additional distances in metric space for multi-vantage-point tree | 4 | 18 |
| Kruglik S. A. Minimum-storage regenerating codes resistant to special adversary | 1 | 38 |
| Melekhin V. B., Khachumov M. V. Planning polyphase behavior of autonomous intelligent mobile systems in uncertain environments | 4 | 28 |
| Mihajlenko K. I., Lukin M. A., Stankevich A. S. A method for decompilation of AMD GCN kernels to OpenCL | 2 | 33 |
| Moldovyan D. N., Moldovyan N. A. A post-quantum digital signature scheme on groups with four-dimensional cyclicity | 2 | 43 |
| Olenev V. L. Analysis of requirements for modern spacecraft onboard network protocols | 1 | 8 |
| Parfiryev A. V., Parfiryeva O. V., Dushkin A. V. Method and algorithm for determining the geographic coordinates of ground objects from an unmanned aerial vehicle | 3 | 19 |
| Pham C. T., Tran T. T. T., Nguyen T. C., Vo D. H. Second-order total generalized variation based model for restoring images with mixed Poisson — Gaussian noise | 2 | 20 |
| Ponomareva O. V., Ponomarev A. V. Theoretical foundations of digital vector Fourier analysis of two-dimensional signals padded with zero samples | 1 | 55 |
| Sivak S. A., Royak M. E., Stupakov I. M., Voznuk E. S., Aleksashin A. S. The implementation of the boundary element method to the Helmholtz equation of acoustics | 2 | 13 |
| Tsilika K. D. Decomposition of abstract linear operators on Banach spaces | 2 | 2 |
| Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. On the convergence of bumping routes to their limit shapes in the RSK algorithm. Numerical experiments | 6 | 2 |
| Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Vorobeva G. R., Khristodulo O. I. Development and application of problem-oriented digital twins for magnetic observatories and variation stations | 2 | 60 |
| Yankovskii N. A., Pastushok I. A. On multiplexing data streams using trellis-coded modulation in centralized wireless networks | 2 | 52 |
| Балонин Н. А., Сергеев А. М., Сеницына О. И. Алгоритмы конечных полей и групп поиска ортогональных последовательностей | 4 | 2 |
| Батенков А. А., Батенков К. А., Фокин А. Б. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий | 6 | 53 |
| Востриков А. А. Матричные витражи и регулярные матрицы Адамара | 5 | 2 |
| Гайфулина Д. А., Котенко И. В. Анализ моделей глубокого обучения для задач обнаружения сетевых аномалий интернета вещей | 1 | 28 |
| Демидовский А. В., Бабкин Э. А. Адаптация нейронных машин Тьюринга для задачи агрегации лингвистических оценок в нейросимволических системах поддержки принятия решений | 5 | 40 |
| Звонарев В. В., Попов А. С. Потенциальная помехоустойчивость когерентного приема четырехпозиционного фазоманипулированного радиосигнала в присутствии когерентной гармонической помехи | 1 | 45 |
| Знатдинов С. И., Осипов Л. А. Подавление коррелированных помех адаптивными режекторными фильтрами при модуляции периода повторения импульсов | 3 | 53 |
| Ковалев А. Д., Никифоров И. В., Дробинцев П. Д. Автоматизированный подход к семантическому поиску по программной документации на основе алгоритма Doc2Vec | 1 | 17 |

| | № | Стр. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|------|
| Корнеева И. П., Крамарь К. А., Семенова Е. А., Сергеев А. М., Юлдашев З. М. Аппаратно-программный комплекс для удаленного мониторинга и контроля состояния беременных женщин | 6 | 21 |
| Круглик С. А., Кучеров Г. А., Назирханова К. Н., Филитов М. Е. Теоретико-информационные проблемы ДНК-памяти | 3 | 39 |
| Лебедев И. С. Сегментирование множества данных с учетом информации воздействующих факторов | 3 | 29 |
| Международная конференция «Big Data Days 2021» | 3 | 61 |
| Михайлов В. В., Колпащиков Л. А., Соболевский В. А., Соловьев Н. В., Якушев Г. К. Методологические подходы и алгоритмы распознавания и подсчета животных на аэрофотоснимках | 5 | 20 |
| Осипов В. Ю., Никифоров В. В. Кодирование и устойчивость обработки сигналов в потоковых рекуррентных нейронных сетях | 3 | 9 |
| Парасич А. В., Парасич В. А., Парасич И. В. Формирование обучающей выборки в задачах машинного обучения. Обзор | 4 | 61 |
| Рюмин Д. А., Кагиров И. А., Аксёнов А. А., Карпов А. А. Аналитический обзор моделей и методов автоматического распознавания жестов и жестовых языков | 6 | 10 |
| Сведения об авторах | 1 | 66 |
| Сведения об авторах | 2 | 73 |
| Сведения об авторах | 3 | 62 |
| Сведения об авторах | 4 | 86 |
| Сведения об авторах | 5 | 59 |
| Сведения об авторах | 6 | 75 |
| Смирнов А. В., Левашова Т. В., Петров М. В. Базовый сценарий интеллектуальной поддержки принятия решений на основе моделей жизни пользователей в цифровой среде | 4 | 47 |
| Смирнова Л. М., Пономаренко Г. Н., Суслев В. Г. Методология и информационно-измерительная система для персонализированного синтеза протезов нижних конечностей | 6 | 64 |
| Татарникова Т. М., Богданов П. Ю. Обнаружение атак в сетях интернета вещей методами машинного обучения | 6 | 42 |
| Тимофеев А. Л., Султанов А. Х. Влияние шума и частоты дискретизации на погрешность дискретного представления изображений | 5 | 33 |
| Томчин Д. А., Ситчихина М. С., Ананьевский М. С., Свенцицкая Т. А., Фрадков А. Л. Прогноз динамики пандемии COVID-19 по России на основе простых математических моделей эпидемий | 6 | 31 |
| Трофимов А. Н., Таубин Ф. А. Вычисление аддитивной границы вероятности ошибки декодирования с использованием характеристических функций | 4 | 71 |
| X Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» — МЭС-2021 | 2 | 72 |

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Текст рукописи должен быть оригинальным, а цитирование и самоцитирование корректно оформлено.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени.

Простые формулы набирайте в Word, сложные с помощью редактора MathType или Equation. Для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта в MathType никогда не пользуйтесь вкладкой Other, Smaller, Larger, используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = - ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в MathType полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» — «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Подробнее см. pdf-файл «Правила подготовки рукописей» (стр. 11) на сайте <https://guar.ru/ric>

Иллюстрации:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio (*.vsd, *.vsdx); Adobe Illustrator (*.ai); Coreldraw (*.cdr, версия не выше 15); Excel (*.xls); Word (*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF), веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF);

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей и названий таблиц на русском и английском языках обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png, *.jpg с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц, doi;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц, doi;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»
Тел.: (812) 494-70-02
Эл. почта: i-us.spb@gmail.com
Сайт: www.i-us.ru