

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

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

6(121)/2022

6(121)/2022

PEER REVIEWED JOURNAL

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

**Founder**

A. Vostrikov

**Publisher**Saint 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

G. Matvienko

Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia

A. Myllari

PhD, Professor, Grenada, West Indies

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

67A, Bol'shaya Morskaya, 190000, Saint Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: [i.us.spb@gmail.com](mailto:i.us.spb@gmail.com)

Tel.: +7 - 812 494 70 02

**THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS***Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. Modeling of bumping routes in the RSK algorithm and analysis of their approach to limit shapes*

2

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS***Zhurba Y. S., Filchenkov A. A., Azarov A. A., Shalyto A. A. Continuous control algorithms for conveyer belt routing based on multi-agent deep reinforcement learning*

10

*Voronkov G. S., Zakoyan A. G., Ivanov V. V., Voronkova A. V., Stepanov I. V., Grakhova E. P., Lyubopytov V. S., Kutluyarov R. V. Fully integrated optical sensor system with intensity interrogation*

20

**HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES***Stepanov D. S., Itsykson V. M. Backend Bug Finder – a platform for effective compiler fuzzing*

31

**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION***Ovchinnikov A. A., Veresova A. M., Fominykh A. A. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events*

41

**STOCHASTIC DYNAMICS AND CHAOS***Ponomarenko V. I., Lapsheva E. E., Prokhorov M. D. Estimation of delay times from time series of ring self-oscillatory time-delay systems*

53

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS***Contents of the journal «Informatsionno-upravliaiushchie sistemy (Information and Control Systems)» for 2022 [№ 1–6]*

66

6(121)/2022

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. Кристодолу,  
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  
К. Е. Самуйлов,  
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. Суткинко,  
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  
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, г. Санкт-Петербург,  
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,  
сайт: <http://i-us.ru>**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА***Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. Modeling of bumping routes in the RSK algorithm and analysis of their approach to limit shapes*

2

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ***Журба Я. С., Фильченков А. А., Азаров А. А., Шалыто А. А. Алгоритмы непрерывного управления для маршрутизации конвейера на основе мультиагентного глубокого обучения с подкреплением*

10

*Воронков Г. С., Закоян А. Г., Иванов В. В., Воронкова А. В., Степанов И. В., Грахова Е. П., Любобытов В. С., Кутлуяров Р. В. Полностью интегральная оптическая сенсорная система с интеррогацией по интенсивности*

20

**ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА***Stepanov D. S., Itsykon V. M. Backend Bug Finder – a platform for effective compiler fuzzing*

37

**КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ***Ovchinnikov A. A., Veresova A. M., Fominykh A. A. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events*

47

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА И ХАОС***Пономаренко В. И., Лапшева Е. Е., Прохоров М. Д. Оценка времен задержки по временным рядам кольцевых автоколебательных систем с запаздыванием*

53

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

62

*Содержание журнала «Информационно-управляющие системы» за 2022 г. [№ 1–6]*

66

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 03.11.22. Подписано в печать 26.12.22. Дата выхода в свет: 29.12.2022.

Формат 60×841/8. Гарнитура CentSchbkCyrill BT. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 11,1. Тираж 1000 экз (1-й завод 50 экз.). Заказ № 665.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

Распространяется бесплатно.

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, 2022





## Modeling of bumping routes in the RSK algorithm and analysis of their approach to limit shapes

N. N. Vassiliev<sup>a,b</sup>, PhD, Phys.-Math., Senior Researcher, [orcid.org/0000-0002-0841-1168](https://orcid.org/0000-0002-0841-1168)

V. S. Duzhin<sup>b</sup>, PhD, Phys.-Math., Senior Lecturer, [orcid.org/0000-0001-8399-284X](https://orcid.org/0000-0001-8399-284X), [vsduzhin@etu.ru](mailto:vsduzhin@etu.ru)

A. D. Kuzmin<sup>b</sup>, Master Student, [orcid.org/0000-0001-9975-4686](https://orcid.org/0000-0001-9975-4686)

<sup>a</sup>Saint-Petersburg Department of V. A. Steklov Institute of Mathematics of the RAS, 27, Fontanka, 191023, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The RSK algorithm establishes an equivalence of finite sequences of elements of linearly ordered sets and pairs of Young tableaux  $P$  and  $Q$  of the same shape. Of particular interest is the study of the asymptotic limit, i. e., the limit shape of the so-called bumping routes formed by the boxes of tableau  $P$  affected in a single iteration of the RSK algorithm. The exact formulae for these limit shapes were obtained by D. Romik and P. Śniady in 2016. However, the problem of investigating the dynamics of the approach of bumping routes to their limit shapes remains insufficiently studied. **Purpose:** To study the dynamics of distances between the bumping routes and their limit shapes in Young tableaux with the help of computer experiments. **Results:** We have obtained a large number of experimental bumping routes through a series of computer experiments for Young tableaux  $P$  of sizes up to  $4 \cdot 10^6$ , filled with real numbers in the range  $[0, 1]$  and sets of inserted values  $a \in [0.1, 0.15, \dots, 0.85]$ . We have compared these bumping routes in the  $L_2$  metric with the corresponding limit shapes and have calculated the average distances and variances of their deviations from the limit shapes. We refined the parameters in the empirical formula for the rate of approach of discretized bumping routes to their limit shapes. Also, the experimental parameters of the normal distributions of the deviations of the bumping routes are obtained for various input values.

**Keywords** – RSK algorithm, RSK correspondence, 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. Modeling of bumping routes in the RSK algorithm and analysis of their approach to limit shapes. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-2-9, EDN: WRCOSH

### Introduction

The Robinson – Schensted – Knuth (RSK) algorithm [1–3] appears in various contexts of mathematics, physics, computer science and their applications [4, 5]. Despite its purely combinatorial nature, RSK has many deep connections with algebra, ergodic theory, and the theory of dynamical systems. In these days, more and more papers appear in which new and unexpected properties of this algorithm are revealed.

The geometry and combinatorics of the bumping routes of the RSK algorithm was studied [6–10] both theoretically and with the help of computer experiments. In [6], the asymptotic behaviour of the convergence of bumping routes to their limit shapes was studied, and exact equations describing such limit shapes were also obtained. In this paper, we study the dynamics of convergence of the generated bumping routes to their limit shapes. Similar simulations have already been performed in [9], but compared to this work, the scheme of experiments was significantly changed. In particular, the number of Young tableaux involved in the simulation was increased, and a larger number of limit shapes of

bumping routes, to which the experimental curves tend, was considered. Here we chose another method for comparing the experimentally obtained bumping routes with their corresponding limit curves. Since the end of the limit shape of a bumping route may not coincide with the end of the experimentally calculated bumping route, the projections of these functions onto the  $x$  axis are generally defined on different intervals. At the same time, in [9] to calculate the deviation of a bumping route from the theoretical limit shape, we scaled the experimental bumping route by multiplying its domain of definition by some constant so that its end coincides with the theoretical one. Finally, the  $L_2$  distance between the scaled experimental bumping route and the theoretical curve was calculated.

This approach led to a significant divergence of the projections of the curves on the  $y$  axis and, as a result, to an inaccurate estimation of the distance between the curves. Therefore, we subsequently abandoned such a scheme. In this article, these curves are compared on the common interval of their definition, i. e., the maximum common value of their projections on the  $x$  axis is chosen. Then the distance between the theoretical and experimental

curves in the  $L_2$  metric is evaluated. This distance is calculated at some fixed number of points on this common definition interval.

**RSK algorithm**

The classical RSK algorithm and its generalizations [1–3] consist of mapping some input sequence of elements of some linearly ordered set to a pair of Young tableaux of the same shape: insertion tableau  $P$  and recording tableau  $Q$ . The entries of the input sequence are processed one by one. If the next entry is the maximum in the first column of the tableau  $P$ , then a new box is added to the tableau on top of the first column. Otherwise, the element is written to the box of the first column with the closest greater value, which is then bumped into the second column. Likewise, the bumped value can either take the position at the top of the second column, or bump the closest greater value to the third one. The iteration of the algorithm ends when the next bumped value turns out to be the maximum in column  $j$  and a box with coordinates  $(i, j)$  is added to the tableau  $P$ . After that, a box filled by the index of the current element of the input sequence adds to tableau  $Q$  at the same position  $(i, j)$ . Thus, the insertion tableau consists of inserted values and is *semi-standard Young tableau* (SSYT) [11, 12], i. e., its values strictly increase along the columns and non-strictly along the rows. The recording tableau is a *standard Young tableau*

(SYT), i. e. the values in it are strictly ordered both in rows and columns.

Figure 1 shows an example of the RSK correspondence between a finite sequence of integers  $\omega$  and a pair of Young tableaux  $P, Q$ . The arrows connect the boxes through which the values are bumped during one iteration of the RSK algorithm when processing the number 9. The sequence of such boxes is called the *bumping route*.

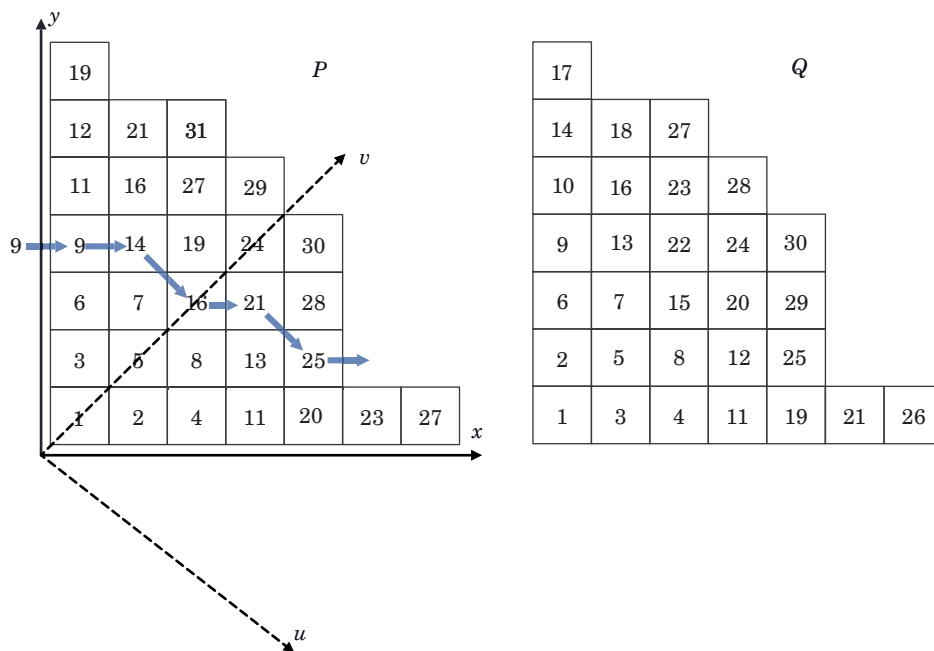
In this work, we use the so-called *French notation* for Young tableaux such as the boxes are aligned along the  $x$  and  $y$  axes. Another notation often used in literature is known as *Russian notation*. It is obtained from the French one by rotating the coordinate axes by 45 degrees clockwise. In Fig. 1, French notation corresponds to the  $x, y$  axes, and Russian notation corresponds to the  $u, v$  axes.

One of important properties of the RSK algorithm is the fact that when applied to a sequence of random uniformly distributed numbers, the resulting tableaux  $P$  and  $Q$  have the so-called *Plancherel distribution* [13]. When the size of the tableaux grows, their profiles tend to some limit shape  $\Omega$ , which is described by the Vershik – Kerov curve [14], given in Russian notation as follows:

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

The limit shapes of the bumping routes are determined by the following formulae [6]:

$\omega = 11, 23, 4, 2, 5, 27, 25, 8, 20, 28, 1, 13, 21, 30, 16, 24, 31, 29, 3, 9, 7, 14, 19, 16, 11, 6, 27, 21, 12, 19, 9$



■ Fig. 1. RSK correspondence between an integer sequence and a pair of Young tableaux

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

$$u_\alpha(t) = \sqrt{t} \cdot F^{-1} \left( \frac{\alpha}{t} \right), \quad 0 \leq \alpha \leq t \leq 1; \quad (3)$$

$$v_\alpha(t) = \sqrt{t} \cdot \Omega \left( F^{-1} \left( \frac{\alpha}{t} \right) \right), \quad 0 \leq \alpha \leq t \leq 1; \quad (4)$$

$$y_\alpha(t) = \frac{v_\alpha(t) + u_\alpha(t)}{2}; \quad (5)$$

$$x_\alpha(t) = \frac{v_\alpha(t) - u_\alpha(t)}{2}; \quad (6)$$

$$\kappa(\alpha) = x_\alpha(1) = \frac{\Omega(F^{-1}(\alpha)) - F^{-1}(\alpha)}{2}; \quad (7)$$

$$\beta_\alpha(s) = y_\alpha(x_\alpha^{-1}(s)), \quad 0 \leq s \leq \kappa(\alpha), \quad (8)$$

where  $\alpha$  is the input value;  $t$  is the intermediate value on the bumping route;  $u_\alpha(t)$ ,  $v_\alpha(t)$ ,  $x_\alpha(t)$ ,  $y_\alpha(t)$  are the projections of the coordinates of the position where the value  $t$  was bumped when the input value  $\alpha$  was processed onto the corresponding axes of the Russian and French notation;  $\kappa(\alpha)$  is the projection of the intersection point of the bumping route and the Vershik – Kerov curve (1) onto the  $x$  axis;  $\beta_\alpha(s)$  is the projection of the position on the bumping route onto the  $y$  axis.

The goal of this article is to study the deviations of the experimental bumping routes from their limit shapes. We consider sequences consisting of random real numbers uniformly distributed in the interval  $[0, 1]$ .

### Computer experiments

Let us describe the computational experiments on modeling the bumping routes in the RSK algorithm and studying their deviations from the limit shapes. With the help of the RSK algorithm, we generated a set of random pairs of SSYT  $P$  and SYT  $Q$  of some fixed size  $n$ , distributed according to the Plancherel measure [13]. Then, again using the RSK algorithm, a certain value of  $\alpha$  was inserted into each of the tableaux  $P$ . The bumping route corresponding to this value was calculated, i. e., the sequence of normalized coordinates of the boxes  $(x_i, y_i)$ , bumped during the iteration of the algorithm. We divide the coordinates by  $\sqrt{n}$  to normalize the area under the profile of the tableau to make it equal to one. Such a normalization is necessary to compare these bumping routes with the limit curves, which are defined by formulae (1)–(8).

As can be seen from formulae (3), (4), in order to calculate a coordinate on the limit shape of a

bumping route, it is necessary to calculate the function inverse to  $F$  from (2). To solve this problem, we formed a table  $T_1$ , in which each value  $u \in [-2, \dots, 2]$ , listed with the step  $4 \cdot 10^{-6}$ , was associated with the corresponding value of the function  $F$ . To calculate  $u = F^{-1}$ , the row with the closest value to  $F$  was selected in  $T_1$ . Similarly, for the calculation  $x_\alpha^{-1}(s)$  from (8), a series of tables  $T_\alpha$  were compiled, for the values of  $\alpha$  defined in the range  $[\alpha, \dots, 1]$  with the step  $10^{-6}$ . So, each of  $T_\alpha$  specifies the correspondence  $t(x_\alpha)$ .

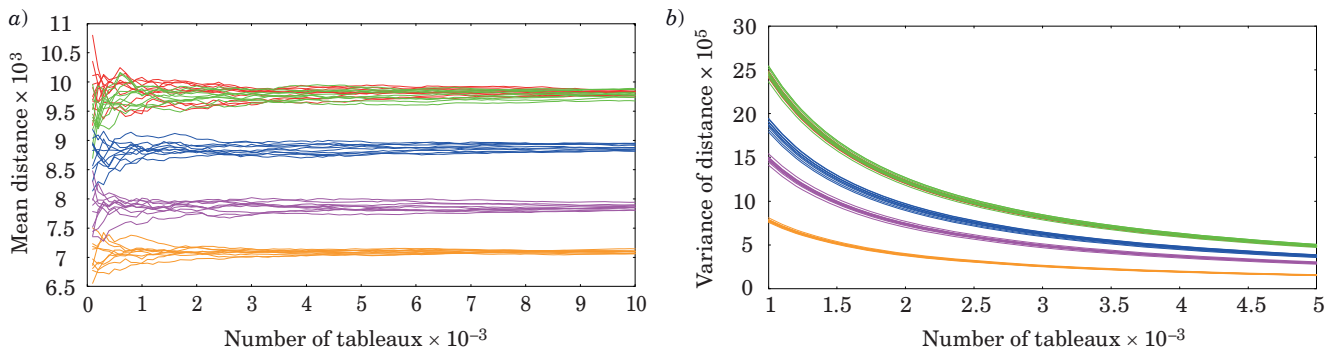
Let us describe how we calculated the coordinates  $(x^*, y^*)$  on the limit shape of a bumping route corresponding to the pair of coordinates  $(x, y)$  on an experimental path. Firstly, it is necessary to calculate  $x_\alpha^{-1}(s)$  from (8). To do this, we find in  $T_\alpha$  the value  $x^*$  closest to  $x$ , which corresponds to some value  $t$ . To calculate  $y^* = y_\alpha(t)$ ,  $t$  is substituted into (5). To calculate  $u_\alpha(t)$  and  $v_\alpha(t)$ , we find in table  $T_1$  the value of  $F$  closest to  $\frac{\alpha}{t}$  which corresponds to  $F^{-1}$ .

Then, the root-mean-square distance  $S$  between the coordinates  $(x, y)$  of the boxes of the constructed bumping route and the corresponding coordinates  $(x^*, y^*)$  of the limit curve was calculated. Thus, we calculated the distance in the  $L_2$  metric between a stepwise bumping route and the limit shape corresponding to the given insertion value.

To estimate the number  $k$  of generated Young tableaux of size  $n = 10^6$  required to reliably calculate the standard deviation of distances  $S$  for a given value of the input parameter  $\alpha$ , a series of random sets of Young tableaux was constructed. For  $\alpha \in [0.1, \dots, 0.85]$ , with the step 0.05, the  $S$  values of the corresponding bumping route were calculated for each tableau in generated sets. Then, we calculate the averages and variances of  $S$  for the first  $k = 100, 200, \dots, 10^4$  tableaux. Figure 2, *a* shows the dependence curves of the average value of  $S$  on the number of bumping routes considered. We constructed 10 random sets of  $10^4$  Young tableaux of size  $10^6$  for  $\alpha = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$  and  $0.9$ .

It could be concluded that the spread in the values of standard deviations decreases significantly with an increase in the number of experiments. Moreover, even if we take 1000 tableaux of size  $10^6$ , the spread can be considered quite acceptable. This conclusion is also confirmed by the variance plot of  $S$  values (Fig. 2, *b*) obtained during this experiment – the variance decreases with an increase in the number of tableaux considered, which is in line with our expectations.

Note that Fig. 2, *b* shows only a segment of the graph for the number of tableaux from 1000 to 5000, since the variance curves are difficult to distinguish in a larger scale. For the number of tableaux up to  $10^4$ , the variances still decrease monotonically.



■ Fig. 2. Dependence of means of  $S$  (a) and variances of  $S$  (b) on the number of considered Young tableaux of size  $10^6$  for input values  $\alpha = 0.1$  (—),  $0.3$  (—),  $0.5$  (—),  $0.7$  (—),  $0.9$  (—)

**Dependence of the distance between the experimental and limit curves on the size of Young tableaux**

In this numerical experiment, the dynamics of convergence of bumping routes to limit curves with increasing size of Young tableaux was studied. The size of considered tableaux varied in the range  $n \in [10^5, \dots, 4 \cdot 10^6]$  with the step  $10^5$ . For each size, a fixed number of  $k$  pairs of tableaux  $P$  and  $Q$  were generated:  $k = 10^4$  tableaux of sizes from  $10^5$  to  $10^6$  and  $k = 1000$  tableaux of sizes from  $11 \cdot 10^5$  to  $4 \cdot 10^6$ . Then, using the RSK algorithm, input values  $\alpha \in [0.1, \dots, 0.85]$  were inserted into each of the obtained tableaux  $P$  with the step 0.05.

For each of the  $k$  constructed bumping routes of size  $n$ , the mean and variance of the root-mean-square distance  $S$  were calculated. For a set of fixed values of  $\alpha$ , the behaviour of the calculated mean values and variances was studied depending on other parameters.

It is obvious that an experimentally obtained bumping route do not coincide with the corresponding limit shape. Moreover, both their domains of definition and their shapes differ. It was decided to calculate the values of  $S$  only on those intervals on which both the experimental bumping routes and their limit shapes were determined. The sections of the bumping routes given by the computer experiment, which go beyond the intervals of existence of the limit shapes, did not participate in the calculation of  $S$ .

It was shown in [9] that the deviations of the bumping routes from the limit shapes for large values of  $n$  are well approximated by an empirically obtained function of the form

$$f(n) = a \cdot n^{-\frac{1}{4}} + b \cdot n^{-\frac{1}{2}}. \tag{9}$$

Thus, the convergence turns out to be quite slow. The results of calculating the deviations obtained in the framework of computer experiments were approximated using the function (9) with free

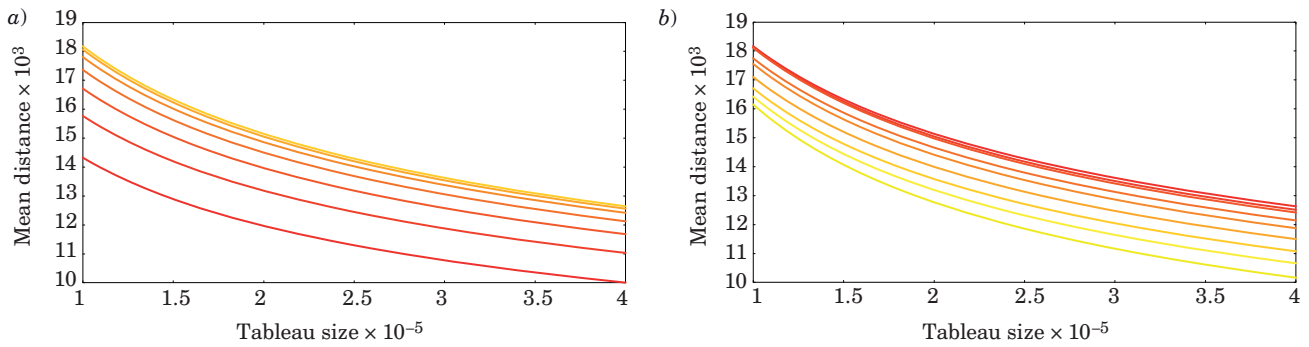
parameters  $a$  and  $b$ . The table below shows the values of the obtained parameters for some input numbers  $\alpha$ , as well as the maximum deviations  $\Delta$  of the approximation curves from the experimental bumping routes. The values of  $\Delta$  show that the approximation accuracy of the empirical formula (9) is quite high.

Figure 3, a, b shows approximation curves for input values  $\alpha \in [0.1, \dots, 0.85]$  with the step 0.05. It is easy to see that the largest deviations of the bumping routes from the limit shapes are achieved at  $\alpha = 0.4$  and  $0.45$ , and the smallest at  $0.1$  and  $0.85$ .

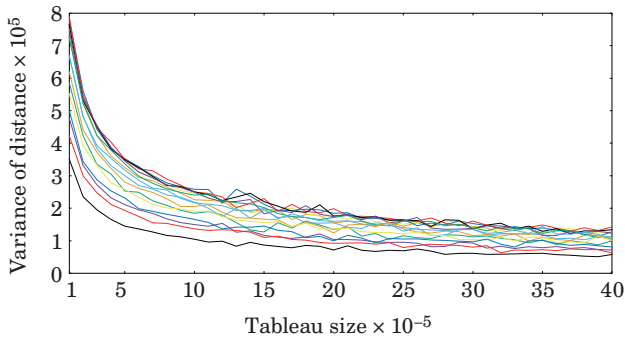
■ Values of the coefficients  $a$  and  $b$  depending on inserted values of  $\alpha$  and the maximum deviations  $\Delta$  of the approximation curves from the experimental bumping routes

$\alpha$	$a$	$b$	$\Delta$
0.1	0.244	0.191	0.000217
0.15	0.270	0.184	0.000239
0.2	0.285	0.213	0.000349
0.25	0.296	0.236	0.000301
0.3	0.302	0.264	0.000209
0.35	0.303	0.325	0.000249
0.4	0.305	0.319	0.000202
0.45	0.304	0.331	0.000298
0.5	0.296	0.475	0.000230
0.55	0.289	0.597	0.000211
0.6	0.281	0.622	0.000233
0.65	0.266	0.826	0.000294
0.7	0.253	0.914	0.000216
0.75	0.233	1.136	0.000270
0.8	0.210	1.457	0.000228
0.85	0.179	1.925	0.000167





■ **Fig. 3.** Approximation curves of average distances between bumping routes in Young tableaux with sizes from  $n = 10^5$  to  $4 \cdot 10^5$  and limit curves corresponding to input values  $\alpha \in [0.1(\text{---}), \dots, 0.4(\text{---})]$  (a);  $\alpha \in [0.45(\text{---}), \dots, 0.85(\text{---})]$  (b) with the step 0.05



■ **Fig. 4.** Variances of distances between bumping routes in Young tableaux with sizes from  $n = 10^5$  to  $4 \cdot 10^6$  and limit curves corresponding to input values  $\alpha \in [0.1, \dots, 0.85]$  with the step 0.05

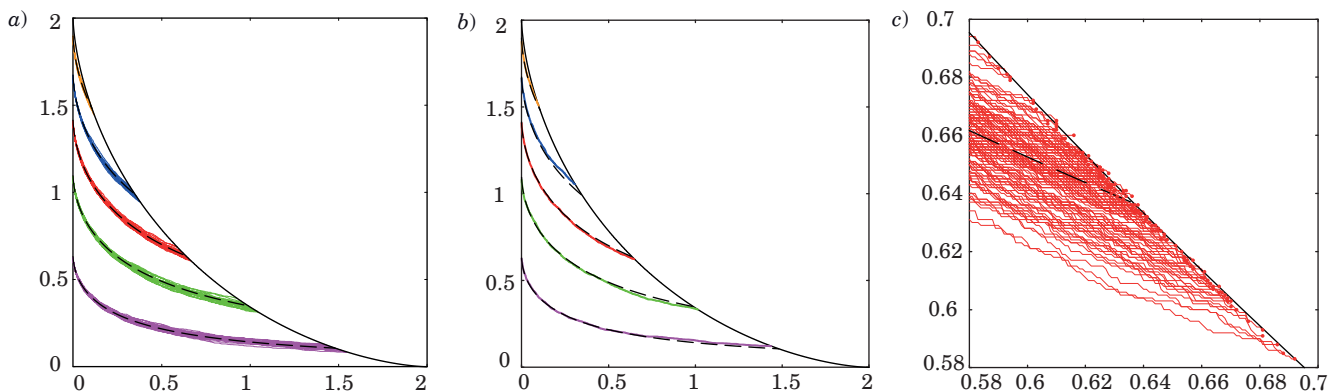
The corresponding variances of the distances between the experimental curves and the limit shapes are shown in Fig. 4. As can be seen, the variances decrease for all considered input values, although not monotonically. Also note that as  $n$  increases, the spread of variances for different  $\alpha$  decreases.

**The coordinates distributions of the ends of the bumping routes obtained in the experiment**

Within the framework of our computer experiments, we have studied the coordinates distributions of the ends of the bumping routes. Also we estimated the values of the parameters of the function approximating these distributions. This experiment actually uses only end points of bumping routes instead of their entire trajectories as the previous one.

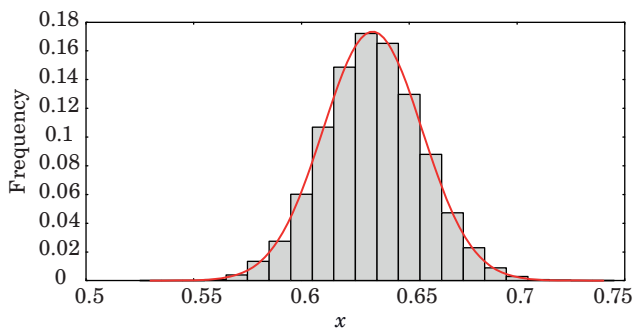
In these calculations, we fixed the input value  $\alpha$ , the number of considered tableaux  $k$  and the size of the tableaux  $n$ . Fig. 5, a demonstrates 20 bumping routes for each input value  $\alpha = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$  inserted into a tableau of size  $10^6$ , as well as the Vershik – Kerov limit shape (1). The corresponding limit curves are dashed. Examples of individual bumping routes for the same set of  $\alpha$  are shown in Fig. 5, b. Figure 5, c shows some final parts of the bumping routes in a high zoom level for the case  $\alpha = 0.5$ . The ends of the bumping routes are marked with red circles.

To study the distribution of the values of the end points, we calculated the number of coordinates belonging to one or another range in  $x$ . As a result, we



■ **Fig. 5.** The spread of the coordinates of the ends of bumping routes for the input values  $\alpha = 0.1(\text{---}), 0.3(\text{---}), 0.5(\text{---}), 0.7(\text{---}), 0.9(\text{---})$ , the limit shapes of bumping routes (---), and the Vershik – Kerov limit shape (—) for 20 (a), 1 (b) bumping routes, and 100 zoomed final parts of the bumping routes for  $\alpha = 0.5$  (c)





■ **Fig. 6.** Frequency histogram of the distribution of the ends of the bumping routes and its approximation using a Gaussian curve

obtained a series of frequency histograms that display how these projections are distributed. An example of one of such histograms is shown in Fig. 6. It is constructed for  $10^5$  bumping routes in tableaux of size  $10^6$ , when processing an input number  $\alpha = 0.5$ .

As can be seen from the figure, the distribution of the projection coordinates of the ends of the bumping routes is in good agreement with the normal distribution with the parameters  $\mu \approx 0.63$ ,  $\sigma \approx 0.023$ . Figure 7, *a*, *b* shows the distribution parameters given by approximating the frequencies of the coordinates of the end points. We considered input values of  $\alpha \in [0.1, \dots, 0.85]$ .

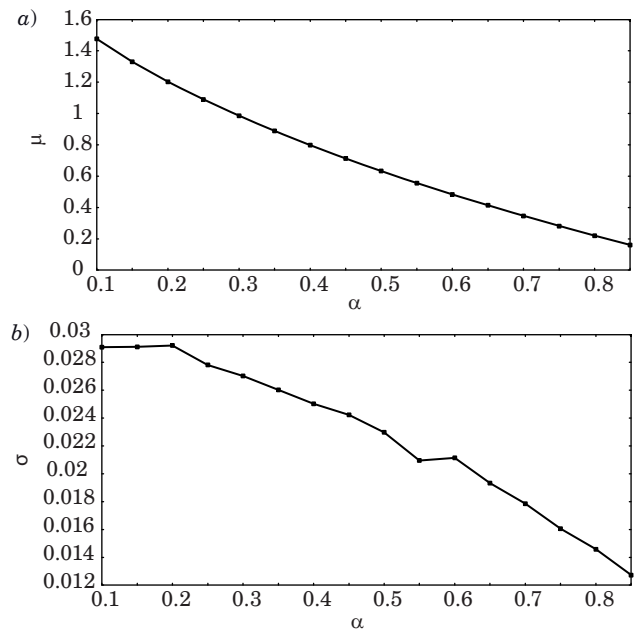
As can be seen from the presented graphs, the dependence of the parameter  $\mu$  of the normal distribution is close to linear on the studied interval of input values. The parameter  $\sigma$  is estimated less reliably than the amplitude  $\mu$ , and the results do not allow us to draw a conclusion about the form of such a dependence.

The software package developed to perform the experiments is implemented in C++ with the aid of OpenMP. Experiments use significant computer resources both in terms of memory and time cost. Our calculations were carried out for more than two weeks of continuous computations on the server Ubuntu 20.04.2 LTS, 240Gb RAM, Xeon Gold 5218.

## Conclusion

Here we have described the results of our computer simulation of the bumping routes in the RSK algorithm obtained on a very large dataset consisting of extra large Young tableaux. We have studied the deviation of these bumping routes from the corresponding theoretical limit shapes.

Our computer experiments show good agreement with the theoretical results obtained in [6] and confirm the empirical asymptotics of the approximation of the bumping routes to their limit shapes. Convergence turns out to be rather slow with the



■ **Fig. 7.** Dependence of the parameters  $\mu$  (*a*) and  $\sigma$  (*b*) of the normal distribution for the input values  $\alpha$

principal term proportional to  $n^{-\frac{1}{4}}$ . As in many problems of asymptotic combinatorics, such experiments require the involvement of a huge number of large Young tableaux. A similar problem and the RSK algorithm itself, are also defined for the case of strict Young tableaux and the Plancherel process on the Schur graph [15–17]. These two Plancherel processes have a close relationship. The limit shapes of the bumping routes for the strict Plancherel tableaux can be derived from ones in the standard case. But, it should be noted that it is possible to construct much larger Young tableaux on the Schur graph. As a result, it could be possible to obtain much more accurate determination of the parameters of the obtained distributions. So, in the future we plan to extend our research to the strict case. For this, it is also planned to expand the functionality of our specialized software.

## Financial support

This work was supported by an RNF grant No. 22-21-00669.

## 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. Loehr N. A. Variants of the RSK algorithm adapted to combinatorial Macdonald polynomials. *J. Combin. Theory. Ser. A*, 2017, vol. 146, pp. 129–164. doi:10.1016/j.jcta.2016.09.002
5. Viennot G. *Une forme géométrique de la correspondance de Robinson – Schensted*. In: *Combinatoire et représentation du groupe symétrique*. Lecture Notes in Math. Springer, 1977. Pp. 29–58 (In French).
6. Romik D., Śniady P. Limit shapes of bumping routes in the Robinson – Schensted correspondence. *Random Struct Algorithms*, 2016, vol. 48, no. 1, pp. 171–182. <https://doi.org/10.1002/rsa.20570>
7. Marciniak M., Maślanka Ł. & Śniady 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>
8. Marciniak M. Hydrodynamic limit of the Robinson – Schensted – Knuth algorithm. *Random Struct Algorithms*, 2021, vol. 181, no. 4. <https://doi.org/10.1002/rsa.21016>
9. 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
10. Duzhin V. S. Investigation of insertion tableau evolution in the Robinson – Schensted – Knuth correspondence. *Discr. Contin. Models Appl. Comput. Sci.*, 2019, vol. 27, no. 4, pp. 316–324. doi:10.22363/2658-4670-2019-27-4-316-324
11. Stanley R. P. *Enumerative combinatorics*. Vol. 2. Cambridge University Press, Cambridge, 1999. 595 p.
12. Fulton W. *Young tableaux: With applications to representation theory and geometry*. Cambridge University Press, 1996. 272 p.
13. Vershik A. M., Kerov S. V. Asymptotics of the Plancherel measure of the symmetric group and the limit form of Young tableaux. *Soviet Math. Dokl.*, 1977, vol. 1, pp. 527–531.
14. Vershik A. M., Kerov S. V. Asymptotic of the largest and the typical dimensions of irreducible representations of a symmetric group. *Functional Anal. Appl.*, 1985, vol. 19(1), pp. 21–31.
15. Worley D. *A theory of shifted Young tableau*. Ph. D. thesis. M.I.T., 1984. 138 p. Available at: <http://hdl.handle.net/1721.1/15599> (accessed 15 September 2022).
16. Sagan B. E. Shifted tableaux, Schur Q-functions and a conjecture of R. Stanley. *J. Combin. Theory. Ser. A*, 1987, vol. 45, pp. 62–103.
17. Matsumoto S., Śniady P. Random strict partitions and random shifted tableaux. *Sel. Math. New Ser.*, 2020, vol. 26, 10 p. <https://doi.org/10.1007/s00029-020-0535-2>

УДК 519.165, 517.938

doi:10.31799/1684-8853-2022-6-2-9

EDN: WRCOSH

### Моделирование путей выталкиваний в алгоритме RSK и анализ их приближения к предельной форме

Н. Н. Васильев<sup>а,б</sup>, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-0841-1168](https://orcid.org/0000-0002-0841-1168)

В. С. Дужин<sup>б</sup>, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель, [orcid.org/0000-0001-8399-284X](https://orcid.org/0000-0001-8399-284X), [vsduzhin@etu.ru](mailto:vsduzhin@etu.ru)

А. Д. Кузьмин<sup>б</sup>, магистрант, [orcid.org/0000-0001-9975-4686](https://orcid.org/0000-0001-9975-4686)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В. А. Стеклова РАН, наб. р. Фонтанки, 27, Санкт-Петербург, 191023, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376, РФ

**Введение:** алгоритм RSK устанавливает эквивалентность последовательностей элементов линейно упорядоченных множеств и пар таблиц Юнга  $P$  и  $Q$  одинаковой формы. Отдельный интерес представляет исследование асимптотического предела, т. е. предельной формы так называемых путей выталкиваний, образуемых выталкиваемыми алгоритмом клетками таблицы  $P$ . Точные формулы для этих предельных форм были ранее получены Д. Ромиком и П. Сняды в 2016. Однако проблема изучения динамики стремления путей выталкиваний к их предельным формам остается недостаточно исследованной. **Цель:** исследовать динамику отклонения путей выталкиваний от их предельных форм в таблицах Юнга с помощью компьютерных экспериментов. **Результаты:** в проведенной серии компьютерных экспериментов для таблиц Юнга  $P$  размеров до  $4 \cdot 10^6$ , заполненных вещественными числами в диапазоне  $[0, 1]$ , и наборов вставляемых значений  $\alpha \in [0.1, 0.15, \dots, 0.85]$  получено большое количество экспериментальных путей выталкиваний, которые сравнивались в метрике  $L_2$  с соответствующими предельными формами. Вычислены средние расстояния и дисперсии их отклонений от предельных кривых. Уточнены параметры в эмпирической формуле для скорости приближения дискретизированных путей выталкиваний к их предельной форме. Получены экспериментальные параметры нормальных распределений отклонения путей выталкиваний для различных входных значений.

**Ключевые слова** – алгоритм RSK, соответствие RSK, 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. Modeling of bumping routes in the RSK algorithm and analysis of their approach to limit shapes. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 6, с. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-2-9, EDN: WRCOSH

**For citation:** Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. Modeling of bumping routes in the RSK algorithm and analysis of their approach to limit shapes. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-2-9, EDN: WRCOSH

---

---

---

---

#### **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 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле вверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>

---

---





## Алгоритмы непрерывного управления для маршрутизации конвейера на основе мультиагентного глубокого обучения с подкреплением

Я. С. Журба<sup>а</sup>, студент, [orcid.org/0000-0003-3281-9216](https://orcid.org/0000-0003-3281-9216)

А. А. Фильченков<sup>а</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-1133-8432](https://orcid.org/0000-0002-1133-8432), [aaafil@mail.ru](mailto:aaafil@mail.ru)

А. А. Азаров<sup>а,б</sup>, канд. техн. наук, научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-3240-597X](https://orcid.org/0000-0003-3240-597X)

А. А. Шалыто<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-2723-2077](https://orcid.org/0000-0002-2723-2077)

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, РФ

<sup>б</sup> Северо-Западный институт управления – филиал РАНХиГС, Средний пр. В. О., 57/43, Санкт-Петербург, 199178, РФ

**Введение:** при перемещении грузов в конвейерной системе необходимо минимизировать не только время транспортировки, но и энергию, затрачиваемую на это перемещение. Энергия перемещения является не декомпозируемой по ребрам функцией, что не позволяет применить к означенной задаче классические алгоритмы маршрутизации. **Цель:** разработать алгоритм маршрутизации, адаптивный к изменениям в топологии графа маршрутизации и способный оптимизировать время доставки и затрачиваемую электроэнергию. **Результаты:** предложен алгоритм на основе мультиагентного глубокого обучения с подкреплением, помещающий агентов в вершины графа конвейерной сети, использующий новую функцию ценности состояний. Алгоритм имеет два настраиваемых параметра: длину пути, по которой считается функция ценности состояния, и коэффициент обучения. Благодаря подбору параметров выявлено, что оптимальными значениями являются 2 и 1 соответственно. На основе экспериментального исследования алгоритма с использованием симуляционной модели установлено, что его применение позволяет свести к нулю число столкновений перемещаемых объектов, обеспечивая достижение устойчивых результатов работы по обоим оптимизируемым функционалам, а также приводит к меньшему потреблению электроэнергии в сравнении с референтным алгоритмом. **Практическая значимость:** предложенный алгоритм может быть использован для уменьшения времени и энергии доставки при управлении конвейерными системами.

**Ключевые слова** – маршрутизация, мультиагентное обучение, обучение с подкреплением, конвейерная лента.

**Для цитирования:** Журба Я. С., Фильченков А. А., Азаров А. А., Шалыто А. А. Алгоритмы непрерывного управления для маршрутизации конвейера на основе мультиагентного глубокого обучения с подкреплением. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 6, с. 10–19. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-10-19, EDN: LKVJNA

**For citation:** Zhurba Y. S., Filchenkov A. A., Azarov A. A., Shalyto A. A. Continuous control algorithms for conveyor belt routing based on multi-agent deep reinforcement learning. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 10–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-6-10-19, EDN: LKVJNA

### Введение

Одним из пластов развития современной постиндустриальной цивилизации является удешевление доставки грузов за счет построения сложных логистических цепочек между центрами производства и до конечного потребителя. Минимизация затрат на логистику и управление логистикой позволяет формировать новые бизнесы в парадигме логистика-как-сервис, к которым относятся компании по доставке еды и продуктов и компании, связывающие таксистов и потребителей [1].

Одновременно с этим растет и число математических постановок такого рода задач, пытающихся вобрать в себя все больше факторов, чтобы обеспечить применимость найденного аналитическим или вычислительным способом решения к исходной проблеме реального мира. Это порождает богатое и неоднородное семейство ма-

тематических постановок задач маршрутизации, тяготеющее к росту числа учитываемых ограничений [2].

Одно из принципиальных и наиболее универсальных таких ограничений – требование адаптируемости решения к изменению исходных условий задачи, например топологии графа [2–4]. Это требование продиктовано регулярными непредсказуемыми воздействиями внешней среды. Например, на дорогах возникают пробки, каналы связи обрываются, пути подвоза подвергаются естественным разрушениям.

Настоящая работа посвящена задаче маршрутизации штучных грузов в конвейерных системах. Она возникает в промышленном производстве [6, 7], в аэропортах в системах распределения багажа [8], в теплицах [9]. Такие конвейерные системы характеризуются высокой значимостью оптимизации потребляемой электроэнергии [5].

Целью данной статьи является разработка алгоритма маршрутизации, адаптивного к изменениям в топологии графа и способного оптимизировать время доставки и затрачиваемую электроэнергию. В качестве основы для разработки алгоритма был выбран подход, использующий мультиагентное глубокое обучение с подкреплением, поскольку мультиагентные подходы известны хорошей адаптивностью под условия среды [10], а глубокое обучение с подкреплением позволяет обучать сложные модели управления [11].

### Формальная постановка задачи

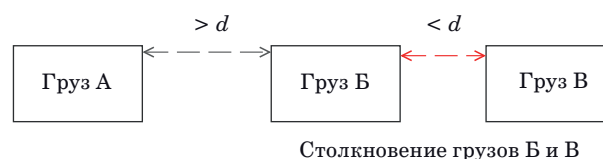
Задача маршрутизации ставится для некоторого графа  $G = \langle E, V \rangle$ , где  $E$  – множество ребер, а  $V$  – множество вершин. Будем полагать, что граф ориентированный. Назовем грузом объект, который будет транспортироваться по данному графу. Необходимо оценивать затраты на доставку груза из вершины  $b$  в вершину  $d$ . Для этого будем считать, что известна стоимость  $c(i, j)$  каждого ребра  $(v_i, v_j) \in E$ . В данном графе при заданных  $b$  и  $d$  необходимо проложить маршрут наименьшей стоимости из  $b$  в  $d$ :

$$\sum_{\substack{i=1 \\ v_1=b \\ (v_i, v_{i+1}) \in E \\ v_n=d}}^n c(i, i+1) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Рассмотрим более частный случай, а именно постановку задачи маршрутизации для конвейерных систем. Модель должна учитывать: 1) возможность столкновения транспортируемых грузов, что является крайне нежелательным событием при транспортировке; 2) затрачиваемую на перемещение энергию. Эти ограничения формируют множество функций оценки качества решения.

Отсутствие столкновений грузов является критически важным условием для работы алгоритма маршрутизации конвейерных систем. Формализуем это условие. Введем параметр  $d > 0$ , который будет отвечать за минимальное допустимое расстояние между грузами; если в какой-то момент времени расстояние будет меньше  $d$ , то система будет фиксировать факт столкновения (рис. 1).

Затрачиваемая на перемещение энергия хотя и положительно скоррелирована со временем доставки, но не эквивалентна ему. В конвейерных лентах энергия тратится на перемещение ленты по участку пути, а не на перемещение конкретного груза, поэтому совокупная энергия, потра-



■ **Рис. 1.** Пример столкновения грузов на конвейере  
 ■ **Fig. 1.** An example of collision of cargo pieces on a conveyor

ченная на перемещение нескольких грузов по одному длинному участку пути, может оказаться меньше, чем энергия, потраченная на перемещение отдельно каждого груза на нескольких коротких участках пути.

Для описания затрачиваемой энергии была использована формула [12]

$$P(V) = \frac{M_c (m_b) \cdot V}{\rho}, \quad (2)$$

где  $V$  – мгновенная скорость ленты конвейера;  $M_c$  – величина полного сопротивления движению, которая зависит от массы всех объектов  $m_b$ , перемещающихся на ленте;  $\rho$  – КПД конвейерной системы.

С точки зрения постановки задачи оптимизации отличие функционала энергии от функционала времени доставки заключается в более сложной математической природе первого, являющегося *не декомпозируемым по ребрам и объектам*, что затрудняет поиск решения классическими алгоритмами. Функция называется декомпозируемой, если ее можно разложить на отдельные части. Например, время доставки груза можно представить как сумму значений времени по ребрам. В случае энергии данное разложение невозможно, поскольку значение затрачиваемой энергии является динамической величиной, описываемой формулой (2).

### Маршрутизация на основе обучения с подкреплением

Классические алгоритмы маршрутизации, такие как, например, алгоритм Дейкстры [13], не позволяют решать задачу поиска оптимального по не декомпозируемому по ребрам функционалу пути. Применимым для такого рода задач подходом является обучение с подкреплением, позволяющее работать с более широким семейством функционалов, чем классические алгоритмы [14].

Обучение с подкреплением является областью машинного обучения и отличается в постановке задачи наличием взаимодействия агента со средой, которое заключается в итеративном совершении действий агентом и получении в от-

вет награды. В процессе обучения агент ищет оптимальную стратегию для наиболее эффективного с точки зрения введенного функционала взаимодействия со средой. Развитие нейронных сетей сформировало подраздел глубокого обучения с подкреплением. Данный подход использует непрерывную обратную связь, чтобы подстраиваться под текущее состояние среды. Это позволяет создавать алгоритмы с высоким уровнем адаптивности под изменчивые условия, что является крайне важным свойством при разработке алгоритмов маршрутизации для конвейерной сети.

**Q-routing**

Алгоритм Q-routing использует в основе метод обучения с подкреплением, но без нейронных сетей [15]. Удобно считать, что в каждую вершину графа помещен агент, а выбор соседа для передачи груза является списком доступных действий. С каждой вершиной ассоциирована таблица оценок ожидаемой награды при выборе того или иного соседа для пересылки груза  $Q_x(d, y)$ , где  $x$  – текущая вершина, в которой находится груз;  $d$  – конечный пункт назначения;  $y$  – один из соседей вершины  $x$ , куда переместится груз. Находясь в вершине  $x$  и стремясь направить объект в конечный пункт  $d$ , при пере-

сылке груза в вершину  $y$  агент получит награду  $Q_x(y, d)$ . Поскольку агент старается максимизировать значение функции  $Q$ , то его невозможно использовать для минимизации среднего времени доставки. Припишем весам всех ребер отрицательный знак и теперь рассмотрим в таком графе задачу максимизации среднего отрицательного времени доставки, решение которой будет совпадать с решением исходной задачи.

Ниже представлена формула, по которой происходит обновления значений функции  $Q$ :

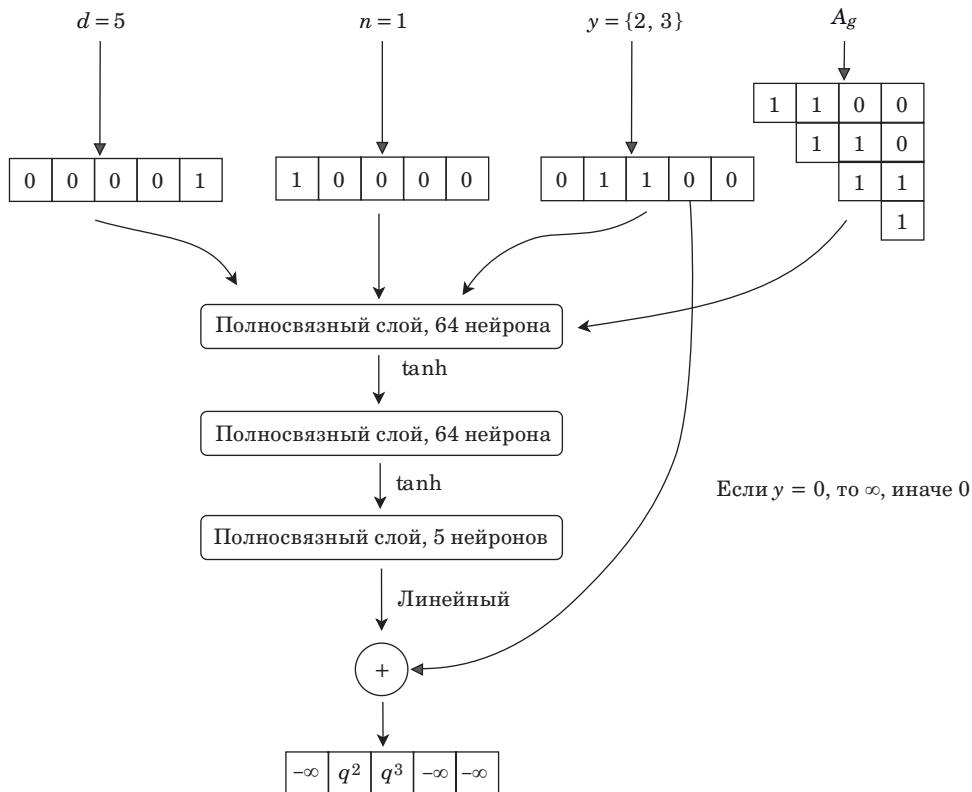
$$Q^*(s) = Q(s) + \alpha(r + \gamma Q(s') - Q(s)). \quad (3)$$

Данный подход обладает хорошей гибкостью, это связано с постоянным получением актуальной оценки действий агента из среды [16]. Существенным недостатком алгоритма является высокое потребление памяти, поскольку под таблицы оценок необходимо выделить место.

**DQN-routing**

Алгоритм DQN-routing был описан в работе [17]. Базовая идея вдохновлена алгоритмом DQN [18]: обновления значений  $Q$ -функции аппроксимируются нейронной сетью (рис. 2).

Она представляет сеть прямого распространения с двумя скрытыми слоями, размер каждо-



■ **Рис. 2.** Архитектура нейронной сети DQN  
 ■ **Fig. 2.** Architecture of the DQN neural network



го слоя составляет 64 нейрона. Слои соединяются функцией активации гиперболического тангенса. Нейронная сеть принимает на вход 1)  $d$  – вершину назначения; 2)  $x$  – текущую вершину; 3)  $y$  – одного из соседей  $x$ ; 4) граф  $G$ , при этом для представления графа используется матрица смежности, а для представления вершин – прямое кодирование. Вектором прямого кодирования вершины выступает вектор длины, равной числу вершин в графе, в котором на позиции номера вершины стоит единица, на остальных позициях стоят нули. Такой метод кодирования помогает избежать корреляции между номерами вершин, что повышает качество работы сети. На выходе сеть возвращает оценочную стоимость пути при выборе в качестве следующей вершины на пути транспортировки груза соседа  $y$ .

Данный подход обладает большей адаптивностью по сравнению с алгоритмом Q-routing, однако имеет недостатки. Во-первых, он потребляет много памяти, так как хранит всю матрицу смежности в каждом узле, что делает данный подход применимым только на графах размерности порядка 100–200 вершин. Во-вторых, требуется предобучение сети.

### DQN-LE

Развитием алгоритма DQN-routing является алгоритм DQN-LE [19]. Основное улучшение состоит в том, что удалось избавиться от необходимости передавать матрицу смежности, поскольку теперь по номерам вершин строятся векторные представления [20], которые отражают меру близости вершин. Функция активации была заменена на ReLU, что ослабило проблему затухания градиента и, как следствие, увеличило скорость обучения агентов.

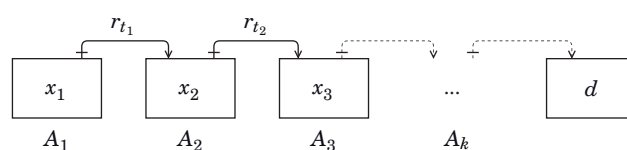
Несмотря на то, что данный подход демонстрирует лучшие результаты работы в конвейерной системе, алгоритм имеет ряд недостатков: 1) сохраняется необходимость предварительного обучения; 2) приближение оценок путей считается недостаточно точно, что приводит к высокой дисперсии при работе алгоритма; 3) незначительное число параметров не позволяет проводить более тонкую настройку работы алгоритма.

### Алгоритм DQN-Path

#### Общее описание алгоритма

Предлагаемый в настоящей работе алгоритм DQN-Path основан на алгоритме DQN-LE.

Средой для агента выступает конвейерная система. В качестве награды используются затрачиваемая энергия и время на перемещение груза, взятое с противоположным знаком. Именно в таком случае максимизация полученной на-



■ **Рис. 3.** Пример перемещения одного груза

■ **Fig. 3.** An example of a single cargo piece transportation

грады будет соответствовать минимизации затраченных времени и энергии.

В вершине  $x_i$  расположен агент, с которым ассоциирована нейронная сеть  $A_i$  (архитектура которой показана на рис. 2). Нейронная сеть принимает на вход векторные представления соседней вершины  $y$  и направления транспортировки  $d$ , а на выход возвращает ожидаемое значение награды  $Q$ . Агент принимает решение, используя стохастический подход, опираясь на softmax-стратегию, при которой вероятность выбрать соседа  $y$  для пересылки ему груза определяется следующим образом:

$$p(y) = \frac{A_i(y, d)}{\sum_{y_j: (x_i, y_j) \in E} A_i(y_j, d)}. \quad (4)$$

Основное отличие алгоритма DQN-Path от DQN-LE заключается в обучении агентов. Для объяснения воспользуемся рис. 3, на котором изображен маршрут движения груза. Через  $x_i$  обозначены вершины, через  $r_{t_i}$  – полученные награды, через  $A_i$  – нейронные сети агентов в соответствующих вершинах,  $d$  – вершина назначения перемещаемого груза. Обучение агента в вершине  $x_1$  происходит следующим образом. После принятого агентом решения груз отправляется в выбранном направлении, и по достижении им следующей вершины можно посчитать реально затраченные время и энергию и, как следствие, вычислить награду  $r_{t_i}$ , полученную за прохождение выбранного агентом участка конвейерной ленты.

#### Уточнение оценок

В алгоритме DQN-LE обучение агента в вершине  $x_1$  происходило за счет обратного распространения ошибки, которая вычислялась как квадрат невязки наблюдаемого значения ценности  $Q$ -функции и ее предсказания:

$$Loss(A_1) = \|Q'_1(x_2, d) - A_1(x_2, d)\|^2, \quad (5)$$

где значение  $Q'_1(x_2, d)$  определялось по формуле

$$Q'_1(x_2, d) = r_{t_1} + A_2(x_3, d). \quad (6)$$

Следует обратить внимание, что оценка ожидаемой награды, используемая в уравнении (6), является в значительной степени неточной, что может приводить к большой дисперсии результатов, как показывают описанные в следующем разделе эксперименты. Уточнение оценки приводит к уменьшению ее смещенности. Для достижения этого обратимся к стандартной формуле ценности состояния для обучения с подкреплением без использования нейронных сетей с одним агентом, записанной в классическом виде [16], в которой пересчитывается оценка целевой функции после совершенного действия в состоянии  $s$  и при переходе в состояние  $s'$ :

$$Q(s) = Q(s) + \alpha(r_{t_1} + \gamma Q(s') - Q(s)). \quad (7)$$

Перепишем ее в следующем виде:

$$Q(s) = Q(s)(1 - \alpha) + \alpha(r_{t_1} + \gamma Q(s')). \quad (8)$$

Далее совершим замену:

$$Q(s) = Q(s)(1 - \alpha) + \gamma Q'(s), \quad (9)$$

где

$$Q'(s) = r_{t_1} + \gamma Q(s'). \quad (10)$$

Уравнения (6) и (10) похожи, но имеют следующие различия:

- 1) в уравнении (6) имеются разные индексы у  $Q$ , это связано с тем, что разным индексам соответствуют разные агенты;
- 2) в уравнении (10) происходит обучение методом экспоненциального скользящего среднего, в отличие от метода обратного распространения ошибок, использующего ошибку из уравнения (5);
- 3) в уравнении (10) используется коэффициент обучения  $\gamma$ . Добавив его к уравнению (6), получим

$$Q'_1(x_2, d) = r_{t_1} + \gamma A_2(x_3, d). \quad (11)$$

Следующая идея для улучшения этой оценки состоит в том, чтобы заменить значение  $A_2$  на  $Q'_2$ , т. е. вместо предсказания оценки следующего агента воспользоваться полученной ценностью состояния. Распишем, в свою очередь, оценку  $Q'_2$ :

$$Q'_2(x_3, d) = r_{t_2} + \gamma A_3(x_4, d). \quad (12)$$

Подставив это значение в уравнение (11), получим

$$Q'_1(x_2, d) = r_{t_1} + \gamma(r_{t_2} + \gamma A_3(x_4, d)), \quad (13)$$

$$Q'_1(x_2, d) = r_{t_1} + \gamma r_{t_2} + \gamma^2 A_3(x_4, d). \quad (14)$$

Продолжив замену на значения функций в следующих вершинах, мы придем к обобщенной формуле

$$Q'_1(x_2, d) = r_{t_1} + \sum_{i=1}^k \gamma^{i-1} r_{t_i} + \gamma^k A_k(x_k, d). \quad (15)$$

Подставив ее в уравнение (5), получим значение ошибки для обучения нейронной сети.

Использование уравнения (15) при обучении позволяет уточнять оценку ценности пути за счет использования обучения не по одному шагу, а по частичному маршруту. Получилась относительно несложная формула, что является несомненным плюсом для реализации алгоритма. Кроме того, алгоритм стал параметрическим, поскольку теперь его работа определяется коэффициентом обучения  $\gamma$  и длиной частичного маршрута.

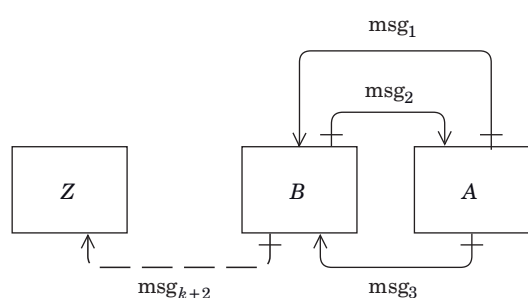
Стоит отметить, что обучение является *асинхронным*, поскольку происходит именно по частичному маршруту груза, а не по подпоследовательности шагов агента. Это хорошо видно из индексов награды, получение которой происходит не в последовательные моменты времени. Строго говоря, обучение происходит на основе одного шага каждого из агентов, соответствующих вершинам отрезка маршрута передачи груза.

### Протоколы общения агентов

Из уравнения (15) видно, что для работы алгоритма необходимо хранить историю посещения последних  $k$  агентов грузом, так как значения наград этого пути используются в формуле для обучения.

Основная идея программной реализации заключается в создании у каждого агента локального хранилища, в котором будут храниться истории маршрутов только что отправленных грузов. В таком случае сохраняется децентрализованность всей системы, при этом получение информации об истории будет осуществляться за счет реализации протокола общения агентов между собой. Опишем работу протокола в общем виде (рис. 4).

Пусть агент  $A$  получил управление от среды с запросом принять решение о пересылке только что прибывшего груза. Предполагается, что груз приехал от агента  $B$ , соответственно, в его локальном хранилище есть информация о маршруте. Поэтому от  $A$  к  $B$  отправляется сообщение с запросом о прибывшем грузе. Агент  $B$ , получив это сообщение, удаляет из своего хранилища информацию о грузе и направляет ее агенту  $A$ . Агент  $A$  обновляет информацию, используя полученные данные, и сохраняет в локальную копию.



■ **Рис. 4.** Иллюстрация работы протокола: msg — пересылаемые между агентами сообщения

■ **Fig. 4.** An illustration of the protocol: msg stands for messages sent between agents

Если накоплен достаточный маршрут для обучения, то история передается по обратному пути, пока не пройдет  $k$  вершин, после этого происходит обучение последнего в этом эпизоде агента  $Z$ , получившего всю необходимую историю.

### Экспериментальное исследование алгоритма

#### Симуляционная модель и сценарии тестирования

Для проведения экспериментов использовалась симуляционная модель конвейерной системы, представленной взвешенным ориентированным графом. Ребрам соответствуют части ленты, при этом ориентация отображает направление движения, а вес является мерой длины. Вершинами являются контрольные точки: стартовые вершины и конечные вершины, а также места стыковки конвейерных лент (все остальные вершины). В каждую вершину помещен агент. Децентрализованность достигается путем ограничения возможности конвейерной системы обмениваться сообщениями между узлами, т. е. каждый узел может посылать сообщения только соседним узлам.

Симуляционная модель позволяет рассчитывать время доставки, энергию доставки согласно уравнению (2), а также фиксировать столкновения грузов.

Для тестирования использовались два типа сценария. Первый тип сценария, *без поломок*, работает с фиксированной топологией графа, при его выполнении случайным образом добавляются грузы со случайно выбранными начальной вершиной из  $B$  и конечной вершиной из  $D$ .

Второй тип сценария, *с поломками*, отображает изменение топологии конвейерной сети. В нем возникают события поломки и восстановления конвейерных лент. Данные события позволяют оценить важнейшее свойство реализованно-

го алгоритма, а именно способность алгоритма к адаптации в условиях изменяющейся нагрузки и топологии сети, а также свойства отказоустойчивости. В остальном он повторяет первый тип.

### Критерии сравнения алгоритмов и оценка статистической значимости

Ключевыми метриками сравнения являются среднее время доставки груза, средняя энергия, затраченная на доставку груза, и число столкновений. Наличие столкновений недопустимо.

Для проверки статистической значимости в работе использовался критерий Уилкоксона для связанных выборок с уровнем значимости 0,05, поскольку сравнивались пары результатов, в которых каждая пара была протестирована на одинаковом сценарии работы конвейера.

### Эксперименты по подбору параметров алгоритма DQN-Path

Алгоритм DQN-Path имеет два параметра: длину пути  $c$  и коэффициент обучения  $\gamma$ . В исследовании рассматривались значения параметра  $c$ , равные 1 и 2. Для каждого варианта длины пути выполнены запуски с различными значениями параметра  $\gamma$  из диапазона  $[0,5; 1,5]$ , среди них оставлены варианты с наилучшими результатами. Такими оказались пары:  $c = 1, \gamma = 1,01$ ;  $c = 2, \gamma = 1$ ;  $c = 2, \gamma = 0,7$ . Также был добавлен вариант  $c = 1, \gamma = 1$ , что полностью соответствует алгоритму DQN-LE. Для каждого из данных алгоритмов подсчитаны средние метрики по десяти запускам. Результаты сравнений представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, значение параметра  $\gamma$  влияет на результат работы алгоритма. Лучшим по обоим критериям является алгоритм со значениями параметров  $c = 2, \gamma = 1$ . Именно данные параметры алгоритма были взяты для тестирования с DQN-LE. Число столкновений во всех алгоритмах равно 0.

■ **Таблица 1.** Сравнение значений параметров по средним показателям

■ **Table 1.** Comparison of parameter values with respect to mean time and mean energy

Алгоритм	Среднее время доставки, с	Средняя затраченная энергия, ед.
DQN-Path, $c = 2; \gamma = 1$	56,025	53 829
DQN-Path, $c = 2; \gamma = 0,7$	56,095	54 120
DQN-Path, $c = 1; \gamma = 1,01$	56,112	54 761
DQN-Path, $c = 1; \gamma = 1$ (DQN-LE)	56,367	55 370



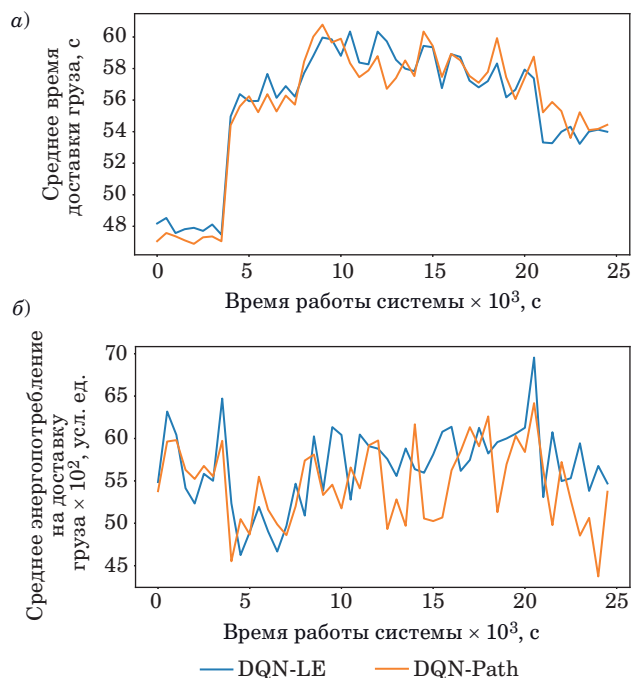
**Эксперименты по сравнению DQN-Path с DQN-LE**

Поскольку алгоритм DQN-LE превосходит классические и нейросетевые алгоритмы с точки зрения адаптивности и возможности использования недекомпозируемых метрик, как было показано в [17, 19], сравнение будет проводиться с ним.

Для тестирования алгоритмов было зафиксировано 20 случайных сценариев, на основе которых строились графики и происходило усреднение метрик.

*Анализ сценария с поломками.* Число столкновений у обоих алгоритмов было равно 0 во всех запусках. Из графика среднего времени доставки (рис. 5, а) непонятно, какой из алгоритмов справился с оптимизацией данной метрики лучше, анализ значений из табл. 2 также не свидетельствует о сколько-то значимых улучшениях. Однако алгоритм DQN-Path отмечается более несмещенной оценкой, а следовательно, более стабильной и прогнозируемой работой.

Из графика средней энергии доставки (рис. 5, б) и табл. 2 заметно улучшение данной метрики. Был проведен статистический тест Уилкоксона, который показал уровень статистической значимости равным 0,00059. Итого имеем уменьшение средней энергии доставки для данного сценария.



■ **Рис. 5.** Зависимость среднего времени (а) и средней энергии (б) доставки груза от времени работы конвейера для сценария с поломками

■ **Fig. 5.** Dependence of the average delivery time (а) and mean energy consumption (б) on conveyor belt system operating time for a breakdown scenario

■ **Таблица 2.** Сравнение средних данных для сценария с поломками

■ **Table 2.** Comparison of the mean time and mean energy for the collision scenarios

Алгоритм	Среднее время доставки, с	Среднее отклонение, с	Средняя энергия, ед.	Среднее отклонение, ед.
DQN-LE	56,047	1,153	51 960	625
DQN-Path 2; 1	56,029	0,309	51 756	507

■ **Таблица 3.** Сравнение средних данных для сценария без поломок

■ **Table 3.** Comparison of the mean time and the mean energy for the collisionless scenarios

Алгоритм	Среднее время доставки, с	Среднее отклонение, с	Средняя энергия, ед.	Среднее отклонение, ед.
DQN-LE	55,141	0,701	51 960	625
DQN-Path 2; 1	54,316 (нет стат. значимости)	0,205	51 756	507

*Анализ сценария без поломок.* Как и в прошлом случае, число столкновений у обоих алгоритмов было равно 0 во всех запусках.

Из табл. 3 следует, что не удалось статистически значимо улучшить среднее время доставки, однако удалось сократить среднее отклонение этой величины. При этом статистически значимо уменьшилась потребляемая энергия и сократилось среднее отклонение этой величины. Статистическая значимость по статистическому тесту Уилкоксона равна 0,000006.

Таким образом, можно заключить, что предложенный алгоритм показывает более устойчивую работу с точки зрения обеих рассмотренных метрик, сокращая среднее отклонение, а также уменьшает затраты на использованную энергию.

**Заключение**

В результате настоящего исследования был разработан алгоритм DQN-Path, который решает задачу маршрутизации штучных грузов на конвейерной ленте на основе мультиагентного глубокого обучения. Новизна алгоритма заключается в подборе функции ценности состояния для агента, которая вычисляется асинхронно для перемещения грузов и позволяет учитывать функцию ценности состояний вершин пути, которые проходит груз. Проведенные эксперименты показали, что использование предложенной

функции ценности увеличивает устойчивость работы алгоритма, а также уменьшает потребляемую конвейером энергию.

Алгоритм может быть применен для управления конвейерными системами и позволит уменьшить энергозатраты при доставке грузов.

Следует также отметить, что алгоритм может быть обобщен на более широкий класс задач маршрутизации и применяться к произвольным оптимизируемым функциям, таким как аморти-

зация грузов / каналов передачи или стоимость доставки.

### Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00700).

## Литература

1. Winkelhaus S., Grosse E. H. Logistics 4.0: A systematic review towards a new logistics system. *International Journal of Production Research*, 2020, vol. 58, iss. 1, pp. 18–43. doi:10.1080/00207543.2019.1612964
2. Toth P., Vigo D. An overview of vehicle routing problems. *The Vehicle Routing Problem* / Eds. Toth P., Vigo D. SIAM, 2002. Pp. 1–26. doi:10.1137/1.9780898718515.ch1
3. Sweda T. M., Dolinskaya I. S., Klabjan D. Adaptive routing and recharging policies for electric vehicles. *Transportation Science*, 2017, vol. 51(4), pp. 1326–1348. doi:10.1287/trsc.2016.0724
4. Puthal M. K., Singh V., Gaur M. S., Laxmi V. C-Routing: An adaptive hierarchical NoC routing methodology. *2011 IEEE/IFIP 19th Intern. Conf. on VLSI and System-on-chip*, IEEE, 2011, pp. 392–397. doi:10.1109/VLSISoC.2011.6081616
5. Marasova D., Andrejiova M., Grincova A. Dynamic model of impact energy absorption by a conveyor belt in interaction with the support system. *Energies*, 2021, vol. 15(1), p. 64. doi:10.3390/en15010064
6. Köken E., Lawal A. I., Onifade M., Özarslan A. A comparative study on power calculation methods for conveyor belts in mining industry. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2022, vol. 36, iss. 1, pp. 26–45. doi:10.1080/17480930.2021.1949859
7. Karami F., Fathi M., Pardalos P. M. Conveyor operations in distribution centers: Modeling and optimization. *Optimization Letters*, 2022. doi:10.1007/s11590-022-01912-7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11590-022-01912-7> (дата обращения: 11.09.2022).
8. Black G., Vyatkin V. Intelligent component-based automation of baggage handling systems with IEC 61499. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, vol. 7, iss. 2, pp. 337–351. doi:10.1109/TASE.2008.2007216
9. Dorri A., Kanhere S. S., Jurdak R. Multi-agent systems: A survey. *IEEE Access*, 2018, no. 6, pp. 28573–28593. doi:10.1109/ACCESS.2018.2831228
10. Arulkumaran K., Deisenroth M. P., Brundage M., Bharath A. A. Deep reinforcement learning: A brief survey. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017, vol. 34, iss. 6, pp. 26–38. doi:10.1109/MSP.2017.2743240
11. Ma D., Carpenter N., Amatya S., Maki H., Wang L., Zhang L., Neeno S., Tuinstra M. R., Jin J. Removal of greenhouse microclimate heterogeneity with conveyor system for indoor phenotyping. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, no. 166. doi:10.1016/j.compag.2019.104979. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016816991930691X> (дата обращения: 11.09.2022).
12. Halepoto I. A., Shaikh M. Z., Chowdhry B. S., Uqaili M. A. Design and implementation of intelligent energy efficient conveyor system model based on variable speed drive control and physical modeling. *International Journal of Control and Automation*, 2016, vol. 9, iss. 6, pp. 379–388. doi:10.14257/ijca.2016.9.6.36
13. Noto M., Sato H. A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm. *2000 IEEE Intern. Conf. on Systems, Man and Cybernetics “Cybernetics Evolving to Systems, Humans, Organizations, and their Complex Interactions” (SMC 2000 Conf. Proc.)*, IEEE, 2000, vol. 3, pp. 2316–2320. doi:10.1109/ICSMC.2000.886462
14. Mammeri Z. Reinforcement learning based routing in networks: Review and classification of approaches. *IEEE Access*, 2019, no. 7, pp. 55916–55950. doi:10.1109/ACCESS.2019.2913776
15. Boyan J., Littman M. Packet routing in dynamically changing networks: A reinforcement learning approach. *NIPS’93: Proc. of the 6th Intern. Conf. on Neural Information Processing Systems*, 1993, pp. 671–678.
16. Sutton R. S., Barto A. G. *Reinforcement Learning: An Introduction*. 2nd ed. MIT Press, 2018. 552 p.
17. Mukhutdinov D., Filchenkov A., Shalyto A., Vyatkin V. Multi-agent deep learning for simultaneous optimization for time and energy in distributed routing system. *Future Generation Computer Systems*, 2019, no. 94, pp. 587–600. doi:10.1016/j.future.2018.12.037
18. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Graves A., Antonoglou I., Wierstra D., Riedmiller M. *Playing Atari with Deep Reinforcement Learning*. arXiv preprint, 2013. <https://arxiv.org/abs/1312.5602> (дата обращения: 11.09.2022).
19. Мухудинов Д. Децентрализованный алгоритм управления конвейерной системой с использованием методов мультиагентного обучения с подкреплением: магистерская дис. СПб., Университет

ИТМО, 2020. 92 с. [http://is.ifmo.ru/diploma-theses/2019/2\\_5458464771026191430.pdf](http://is.ifmo.ru/diploma-theses/2019/2_5458464771026191430.pdf). (дата обращения: 11.09.2022).

**20. Belkin M., Niyogi P.** Laplacian eigenmaps and spectral techniques for embedding and clustering.

*NIPS'01: Proc. of the 14th Intern. Conf. on Neural Information Processing Systems: Natural and Synthetic*, 2001, pp. 585–591. doi:10.5555/2980539.2980616

UDC 004.8+65.011.56

doi:10.31799/1684-8853-2022-6-10-19

EDN: LKVJNA

### Continuous control algorithms for conveyor belt routing based on multi-agent deep reinforcement learning

Y. S. Zhurba<sup>a</sup>, Student, [orcid.org/0000-0003-3281-9216](https://orcid.org/0000-0003-3281-9216)

A. A. Filchenkov<sup>a</sup>, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-1133-8432](https://orcid.org/0000-0002-1133-8432), [aaafil@mail.ru](mailto:aaafil@mail.ru)

A. A. Azarov<sup>a,b</sup>, PhD, Tech., Research Fellow, [orcid.org/0000-0003-3240-597X](https://orcid.org/0000-0003-3240-597X)

A. A. Shalyto<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0002-2723-2077](https://orcid.org/0000-0002-2723-2077)

<sup>a</sup>ITMO University, 49, Kronverksky Pr., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>North-West Institute of Management – Branch of the RANEPa, 57/43, Sredny Pr., V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** We consider the problem of routing of piece cargo by a conveyor system. When moving cargo pieces, it is necessary not only to minimize the time of transportation, but also to minimize the energy spent on it. **Purpose:** Development of a routing algorithm that is adaptive to changes in the topology of the routing graph and is able to optimize the delivery time and the consumed energy. **Results:** We propose an algorithm based on multi-agent deep reinforcement learning that places agents at the vertices of a conveyor network graph and uses a new state value function. The algorithm has two tunable parameters: the length of the path along which the state value function is calculated, and the learning coefficient. Through the selection of parameters, we have revealed that the optimal values are 2 and 1, respectively. An experimental study of the algorithm using a simulation model has shown that it allows to reduce the number of collisions of moving objects to zero, demonstrates stable results for both optimized scores, and also leads to a lower energy consumption compared with the method used as a baseline. **Practical relevance:** The proposed algorithm can be used to reduce delivery time and energy when managing conveyor systems.

**Keywords** – routing, multi-agent learning, reinforcement learning, conveyor belt.

**For citation:** Zhurba Y. S., Filchenkov A. A., Azarov A. A., Shalyto A. A. Continuous control algorithms for conveyor belt routing based on multi-agent deep reinforcement learning. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 10–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-6-10-19, EDN: LKVJNA

#### Financial support

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00700).

#### References

1. Winkelhaus S., Grosse E. H. Logistics 4.0: A systematic review towards a new logistics system. *International Journal of Production Research*, 2020, vol. 58, iss. 1, pp. 18–43. doi:10.1080/00207543.2019.1612964
2. Toth P., Vigo D. *An overview of vehicle routing problems*. In: *The Vehicle Routing Problem*. Eds. P. Toth, D. Vigo. SIAM, 2002. Pp. 1–26. doi:10.1137/1.9780898718515.ch1
3. Sweda T. M., Dolinskaya I. S., Klabjan D. Adaptive routing and recharging policies for electric vehicles. *Transportation Science*, 2017, vol. 51(4), pp. 1326–1348. doi:10.1287/trsc.2016.0724
4. Puthal M. K., Singh V., Gaur M. S., Laxmi V. C-Routing: An adaptive hierarchical NoC routing methodology. *2011 IEEE/IFIP 19th Intern. Conf. on VLSI and System-on-chip*, IEEE, 2011, pp. 392–397. doi:10.1109/VLSISoC.2011.6081616
5. Marasova D., Andrejiova M., Grincova A. Dynamic model of impact energy absorption by a conveyor belt in interaction with the support system. *Energies*, 2021, vol. 15(1), p. 64. doi:10.3390/en15010064
6. Köken E., Lawal A. I., Onifade M., Özarslan A. A comparative study on power calculation methods for conveyor belts in mining industry. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2022, vol. 36, iss. 1, pp. 26–45. doi:10.1080/17480930.2021.1949859
7. Karami F., Fathi M., Pardalos P. M. Conveyor operations in distribution centers: Modeling and optimization. *Optimization Letters*, 2022. doi:10.1007/s11590-022-01912-7. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11590-022-01912-7> (accessed 11 September 2022).
8. Black G., Vyatkin V. Intelligent component-based automation of baggage handling systems with IEC 61499. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, vol. 7, iss. 2, pp. 337–351. doi:10.1109/TASE.2008.2007216
9. Dorri A., Kanhere S. S., Jurdak R. Multi-agent systems: A survey. *IEEE Access*, 2018, no. 6, pp. 28573–28593. doi:10.1109/ACCESS.2018.2831228
10. Arulkumaran K., Deisenroth M. P., Brundage M., Bharath A. A. Deep reinforcement learning: A brief survey. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017, vol. 34, iss. 6, pp. 26–38. doi:10.1109/MSP.2017.2743240
11. Ma D., Carpenter N., Amatya S., Maki H., Wang L., Zhang L., Neeno S., Tuinstra M. R., Jin J. Removal of greenhouse microclimate heterogeneity with conveyor system for indoor phenotyping. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, no. 166. doi:10.1016/j.compag.2019.104979. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016816991930691X> (accessed 11 September 2022).
12. Halepoto I. A., Shaikh M. Z., Chowdhry B. S., Uqaili M. A. Design and implementation of intelligent energy efficient conveyor system model based on variable speed drive control and physical modeling. *International Journal of Control and Automation*, 2016, vol. 9, iss. 6, pp. 379–388. doi:10.14257/ijca.2016.9.6.36
13. Noto M., Sato H. A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm. *2000 IEEE Intern. Conf. on Systems, Man and Cybernetics “Cybernetics Evolving to Systems, Humans, Organizations, and their Complex Interactions” (SMC 2000 Conf. Proc.)*, IEEE, 2000, vol. 3, pp. 2316–2320. doi:10.1109/ICSMC.2000.886462
14. Mammeri Z. Reinforcement learning based routing in networks: Review and classification of approaches. *IEEE Ac-*

- cess, 2019, no. 7, pp. 55916–55950. doi:10.1109/ACCESS.2019.2913776
15. Boyan J., Littman M. Packet routing in dynamically changing networks: A reinforcement learning approach. *NIPS'93: Proc. of the 6th Intern. Conf. on Neural Information Processing Systems*, 1993, pp. 671–678.
  16. Sutton R. S., Barto A. G. *Reinforcement Learning: An Introduction*. 2nd ed. MIT Press, 2018. 552 p.
  17. Mukhutdinov D., Filchenkov A., Shalyto A., Vyatkin V. Multi-agent deep learning for simultaneous optimization for time and energy in distributed routing system. *Future Generation Computer Systems*, 2019, no. 94, pp. 587–600. doi:10.1016/j.future.2018.12.037
  18. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Graves A., Antonoglou I., Wierstra D., Riedmiller M. *Playing Atari with Deep Reinforcement Learning*. arXiv preprint, 2013. Available at: <https://arxiv.org/abs/1312.5602> (accessed 11 September 2022).
  19. Mukhutdinov D. *Detsentralizovannyi algoritm upravleniya konveyernoy sistemoy s ispolzovaniyem metodov multiagentnogo obucheniya s podkrepleniem* [Decentralized conveyor system control algorithm using methods of multi-agent reinforcement learning. Master diss.] Saint-Petersburg, Universitet ITMO Publ., 2020. 92 p. (In Russian). Available at: [http://is.ifmo.ru/diploma-theses/2019/2\\_5458464771026191430.pdf](http://is.ifmo.ru/diploma-theses/2019/2_5458464771026191430.pdf). (accessed 11 September 2022).
  20. Belkin M., Niyogi P. Laplacian eigenmaps and spectral techniques for embedding and clustering. *NIPS'01: Proc. of the 14th Intern. Conf. on Neural Information Processing Systems: Natural and Synthetic*, 2001, pp. 585–591. doi:10.5555/2980539.2980616

## 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](mailto: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.*





## Полностью интегральная оптическая сенсорная система с интеррогацией по интенсивности

Г. С. Воронков<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-8788-2696](https://orcid.org/0000-0002-8788-2696), [voronkov.gs@ugatu.su](mailto:voronkov.gs@ugatu.su)

А. Г. Закоян<sup>а</sup>, студент, [orcid.org/0000-0002-6362-0755](https://orcid.org/0000-0002-6362-0755)

В. В. Иванов<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0002-4716-9466](https://orcid.org/0000-0002-4716-9466)

А. В. Воронкова<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-7060-952X](https://orcid.org/0000-0002-7060-952X)

И. В. Степанов<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0003-4677-5808](https://orcid.org/0000-0003-4677-5808)

Е. П. Грахова<sup>а</sup>, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, [orcid.org/0000-0003-2207-2702](https://orcid.org/0000-0003-2207-2702)

В. С. Любобытов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-1535-5341](https://orcid.org/0000-0003-1535-5341)

Р. В. Кутлуяров<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-2724-6978](https://orcid.org/0000-0003-2724-6978)

<sup>а</sup>Уфимский университет науки и технологий, Заки Валиди ул., 32, Уфа, 450076, РФ

**Введение:** сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники являются важнейшим направлением развития встраиваемых информационно-управляющих систем различного назначения. Выходные характеристики сенсорной системы существенно определяются эффективностью устройства опроса датчика. Считывающее устройство (интеррогатор) на основе микрокольцевого резонатора с применением метода интеррогации по интенсивности способно обеспечить высокую скорость опроса и чувствительность, соответствующую требованиям широкого спектра приложений. **Цель:** создать эффективную сенсорную систему для безмаркерного определения концентрации веществ в жидкости, включающую рефрактометрический датчик и устройство опроса, расположенные на одной фотонной интегральной схеме. **Методы:** проведено численное моделирование процессов распространения электромагнитного поля в направляющей системе (кремниевых волноводах в интегральном исполнении на подложке из оксида кремния) с использованием среды Ansys Lumerical и алгоритма FDTD. Параметры микрокольцевых резонаторов предварительно оптимизированы с целью получить коэффициенты связи между волноводами, обеспечивающие режим работы резонаторов, близкий к режиму критической связи. **Результаты:** предложена концепция полностью интегральной фотонной сенсорной системы на основе микрокольцевых add-drop-резонаторов. Разработан сенсор на основе микрокольцевых резонаторов, представляющий из себя два полукольца радиусом 18 мкм, соединенных участками прямых волноводов длиной 3 мкм. Разработано опрашивающее устройство в формате микрокольцевого резонатора радиусом 10 мкм. Согласно результатам моделирования с использованием широкополосного источника излучения чувствительность сенсора составила 110 нм (или 1350 дБ) на единицу изменения показателя преломления. Предложена методика выбора оптимальных характеристик сенсора и интеррогатора с точки зрения повышения эффективности работы системы в целом. **Практическая значимость:** сенсорные системы на основе фотонных интегральных схем способны удовлетворить существующий спрос на устройства, характеризующиеся низким энергопотреблением, компактностью, невосприимчивостью к электромагнитным помехам и малой стоимостью.

**Ключевые слова** – фотонные интегральные схемы, интеррогация по интенсивности, сенсор, сенсорная система, микрокольцевой резонатор.

**Для цитирования:** Воронков Г. С., Закоян А. Г., Иванов В. В., Воронкова А. В., Степанов И. В., Грахова Е. П., Любобытов В. С., Кутлуяров Р. В. Полностью интегральная оптическая сенсорная система с интеррогацией по интенсивности. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 6, с. 20–30. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-20-30, EDN: VOWUUQ

**For citation:** Voronkov G. S., Zakoyan A. G., Ivanov V. V., Voronkova A. V., Stepanov I. V., Grakhova E. P., Lyubopytov V. S., Kutluyarov R. V. Fully integrated optical sensor system with intensity interrogation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 20–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-6-20-30, EDN: VOWUUQ

### Введение

В настоящее время оптические сенсорные системы являются одним из наиболее динамично развивающихся элементов встраиваемых информационно-измерительных и управляющих систем. Благодаря высокой чувствительности, невосприимчивости к электромагнитным наводкам и другим преимуществам оптические датчики широко применяются в здравоохранении [1], охране окружающей среды [2, 3] и промышлен-

ности [4, 5]. В частности, анализаторы для безмаркерного определения концентрации веществ в жидкости играют значительную роль в медицине [6], экспериментальной биологии [7] и прикладной химии [8].

В общем случае структура оптической сенсорной системы включает датчик, источник света, детектор, а также схему опроса и контроля. Следуя современному вызову создания компактных и одновременно высокопроизводительных устройств, различные компоненты системы мо-

гут быть эффективно реализованы на основе технологии интегральной фотоники.

Среди подходов к реализации датчиков на фотонных интегральных схемах (ФИС) наиболее привлекательными с точки зрения технологичности представляются фазочувствительные схемы на основе волноводных брэгговских решеток [9–12], волноводных интерферометров Маха – Цендера [13–15], микрокольцевых или дисковых резонаторов [16–18]. Для изготовления интегральных сенсоров применяются платформы из нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) и кремний на стекляной или полимерной подложке (silicon-on-insulator, SOI). Нитрид кремния обеспечивает прозрачность для длин волн в видимом и ближайшем инфракрасном диапазоне. Это является важным преимуществом, так как для биосенсоров часто необходимо обеспечивать повышенную чувствительность именно в видимом спектре. Для работы в ближнем инфракрасном диапазоне чаще всего используют структуры SOI. При этом сенсоры на SOI имеют существенно меньшие размеры.

Среди известных решений наибольший потенциал для реализации безмаркерных детекторов демонстрируют датчики на основе микрокольцевых резонаторов (МКР) [19], так как они обладают значительной чувствительностью к обнаружению биомолекул в жидкостях и газах, являются быстродействующими и энергоэффективными [17, 18]. В основе принципа работы сенсора лежит зависимость резонансной длины волны кольца от показателя преломления (ПП) среды вблизи сенсора, значение которого определяется исследуемым параметром вещества.

В зависимости от вида волновода и выбранной рабочей моды значение чувствительности сенсора на МКР варьируется на данный момент от 70 до 490 нм/RIU [16] (RIU – refractive index unit, единица ПП). Для повышения этого показателя используют метод каскадирования колец [18, 20], субволновые решетчатые микрокольца [21, 22] или МКР на фазосдвигающей брэгговской решетке (phase-shifted Bragg grating microring) [23]. Без применения указанных методов чувствительность сенсоров на МКР составляет около 100 нм/RIU.

Наряду с характеристиками датчика показатели качества сенсорной системы в значительной степени определяются эффективностью системы опроса (интеррогации). Для оценки изменения оптического спектра применяются коммерческие интеррогаторы, которые используют оптические анализаторы спектра или перестраиваемые лазеры [24]. Недостатками этих методов являются высокая стоимость оборудования, низкая скорость опроса датчика и громоздкость системы.

Для расширения области практического применения были разработаны косвенные методы анализа спектра оптического излучения для высокоскоростной интеррогации с высоким разрешением [25]. Эти методы основаны на преобразовании сдвигов длины волны оптического сигнала в изменение параметров электрического сигнала и их оценке. В соответствии с регистрируемыми параметрами электрического сигнала выделяют три способа интеррогации: по интенсивности – при измерении мощности фототока [26], по частоте – при оценке частоты сигнала на выходе фотодетектора [27, 28] и по времени – при анализе формы огибающей выходного сигнала [29].

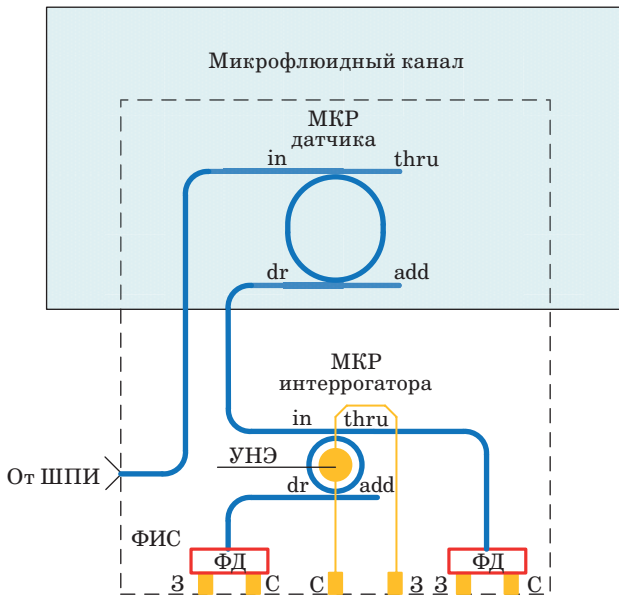
Несмотря на многообещающие перспективы, интеррогация по частоте и по форме требует использования быстродействующих аналого-цифровых преобразователей [30]. В свою очередь интеррогация по интенсивности является простым, но эффективным методом, обеспечивающим быстрый опрос датчиков с разрешением, достаточным для применения во многих областях [24]. Суть метода заключается в использовании оптического элемента, передаточная функция которого близка к линейной в диапазоне измеряемых длин волн (таким элементом может быть МКР [26]), для преобразования изменения длины волны излучения в изменение оптической интенсивности.

Таким образом, кремниевые оптические датчики стали перспективной площадкой для различных сенсорных приложений. Однако интеррогаторы для их опроса все еще остаются громоздкими и негибкими, что сводит на нет преимущества оптических сенсоров в интегральном исполнении. Следовательно, разработка полностью интегральной сенсорной системы, сочетающей в себе датчик и интеррогатор, реализованные на единой платформе, может стать следующим шагом на пути к технологическому совершенству в данной области.

В статье предложена концепция сенсорной системы на ФИС, реализованная на платформе SOI, для безмаркерного определения концентрации веществ в жидкости, включающая рефрактометрический датчик и устройство опроса. Предложена методика выбора оптимальных характеристик сенсора и интеррогатора с точки зрения повышения эффективности работы системы в целом.

### Архитектура и принцип действия предлагаемой сенсорной системы

Структура предлагаемой сенсорной системы приведена на рис. 1. На входной порт МКР, выполняющего функцию сенсора, поступает



■ **Рис. 1.** Структурная схема сенсорной системы: ШПИ – широкополосный источник; УНЭ – управляющий нагревательный элемент; ФД – фотодетекторы на through- и drop-портах; З – контакт точки общей шины («земля»); С – контакт сигнального проводника («сигнал»)

■ **Fig. 1.** Block scheme of the sensing system: ШПИ – broadband source; МКР датчика – MRR sensor; МКР интеррогатора – MRR interrogator; УНЭ – heater; ФД – photodetectors on through- and drop-ports; З – ground; С – signal

широкополосный сигнал от источника оптического излучения. Используются МКР с подводящим и отводящим волноводами, получившие в литературе название add-drop-резонаторов. Интенсивность и ширина полосы сигнала на выходе drop-порта сенсора определяется его резонансной характеристикой. Ширина полосы пропускания МКР по уровню половинной мощности (full width at half maximum, FWHM) при этом определяется по формуле [30]

$$FWHM = \frac{(1 - r_1 r_2 a) \lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 a}}, \quad (1)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – коэффициенты передачи каплевров на in-through- и add-drop-волноводы соответственно;  $a = \exp(\alpha L/2)$  – коэффициент передачи в кольце, измеренный в FDTD (Finite Difference Time Domain, метод конечных разностей во временной области),  $\alpha$  – коэффициент затухания в кольце;  $\lambda_{res}$  – резонансная длина волны МКР ( $\lambda_{res} = 2\pi n_{eff} R/m$ ),  $m$  – номер резонанса (натуральные числа, больше или равные 1);  $L = 2\pi R$  – длина окружности кольца,  $R$  – радиус кольца;  $n_g, n_{eff}$  – значения группового и эффективного ПП соответственно.

Коэффициенты передачи на выходе through- и drop-портов определяются амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) МКР:

$$T_t = \frac{I_t}{I_{in}} = \frac{r_2^2 a^2 - 2r_1 r_2 a \cos \varphi + r_1^2}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \varphi + (r_1 r_2 a)^2}; \quad (2)$$

$$T_d = \frac{I_d}{I_{in}} = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)a}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \varphi + (r_1 r_2 a)^2}, \quad (3)$$

где  $I_t, I_d, I_{in}$  – интенсивности на through-, drop-, in-портах;  $\varphi$  – фазовый сдвиг, определяемый как  $\varphi = \beta L$  (коэффициент фазы  $\beta = 2\pi n_{eff}/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны).

Частота и интенсивность оптического излучения на выходе МКР определяются его конструкцией и ПП окружающей волноводы среды. Эти два свойства и используются в рассматриваемой сенсорной системе. Длина волны оптического излучения на выходе сенсора изменяется при изменении ПП анализируемой среды (аналита). Интенсивность оптического излучения на drop-порте интеррогатора изменяется в зависимости от длины волны излучения на его входном порте. Изменение какого-либо параметра (состава, концентрации, температуры) жидкости, протекающей по поверхности сенсора, приводит к изменению ее ПП. Это изменяет эффективный ПП  $n_{eff}$  датчика, и, следовательно, происходит изменение резонансной длины волны МКР. На рис. 2 показаны передаточные характеристики интеррогатора и сенсоров для различных значений ПП анализатора.

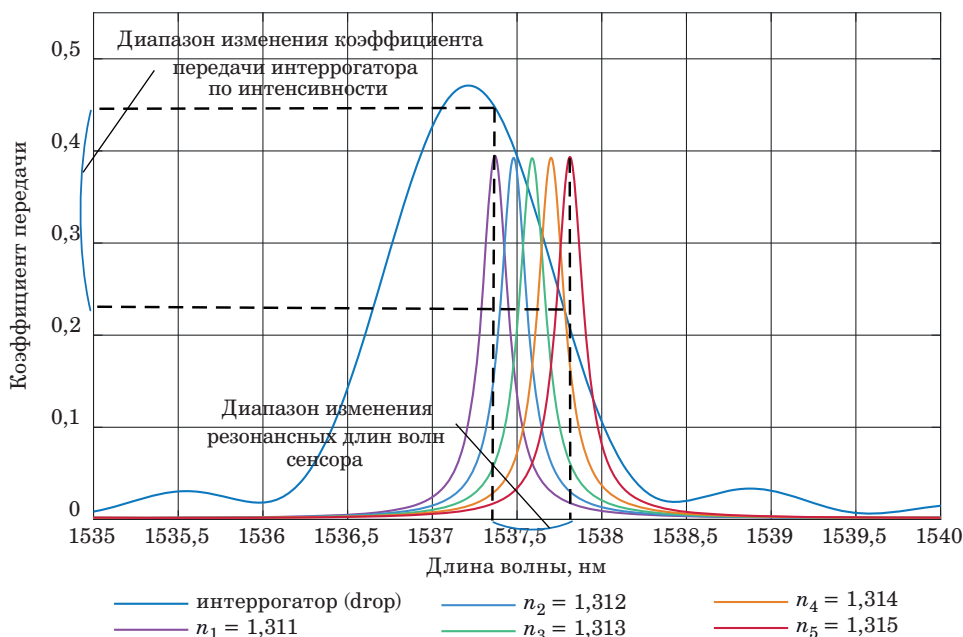
Анализ рис. 2 позволяет сформулировать некоторые важные требования к сенсорной системе, состоящей из двух кольцевых структур. Во-первых, представляется очевидным, что FWHM сенсора должен быть существенно меньше, чем FWHM интеррогатора, для обеспечения большей чувствительности интеррогатора. Следовательно, добротность  $Q$  для интеррогатора должна быть ниже, чем для сенсора:

$$Q = \frac{\lambda_{res}}{FWHM}. \quad (4)$$

Реальное соотношение между FWHM сенсора и интеррогатора необходимо определять для конкретных сценариев применения и диапазона изменения резонансной длины волны сенсора.

Во-вторых, необходимо учитывать, что в МКР резонансы возникают периодически с шагом, определяемым параметром FSR (free spectral range):

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L} \approx \frac{\lambda_{res}}{FWHM}. \quad (5)$$



■ **Рис. 2.** Передаточные характеристики drop-портов интеррогатора и сенсоров при различных значениях ПП аналита  
 ■ **Fig. 2.** Spectra of interrogator and sensors drop-ports at different refractive indices of analyte

Для повышения качества сенсорной системы необходимо обеспечить выполнение следующего условия: длины волн резонансных характеристик сенсора и интеррогатора совпадают (близки) в диапазоне длин волн, используемых для работы сенсорной системы, и существенно отличны в остальном частотном диапазоне ШПИ. На практике целесообразно подбирать (проектировать) ШПИ таким образом, чтобы ширина полосы его излучения незначительно превышала половину FWHM интеррогатора, а центральная длина волны соответствовала середине монотонного участка АЧХ интеррогатора, используемого для преобразования длины волны излучения в интенсивность.

Одним из основных недостатков системы интеррогации по интенсивности является ее зависимость от нестабильности мощности источника оптического излучения. Для того чтобы избавиться от этого недостатка, в качестве измерительного сигнала предлагается использовать относительную величину, определяемую как

$$P = 10 \lg \left( \frac{P_d}{P_d + P_t} \right), \quad (6)$$

где  $P_d = P_{in} T_d$  – мощность на drop-порте;  $P_t = P_{in} T_t$  – мощность на through-порте,  $P_{in0}$  – медианное значение мощности источника. С учетом того, что  $P_{in} = P_{in0} + \Delta P_{in}$  ( $\Delta P_{in}$  – отклонение выходной мощности):

$$P = 10 \lg \left( \frac{(P_{in0} + \Delta P_{in}) T_d}{(P_{in0} + \Delta P_{in}) T_d + (P_{in0} + \Delta P_{in}) T_t} \right).$$

Получаем

$$P = 10 \lg \left( \frac{T_d}{T_d + T_t} \right).$$

Таким образом, регистрируемая в системе относительная мощность не зависит от колебаний мощности источника излучения и определяется только передаточными характеристиками МКР.

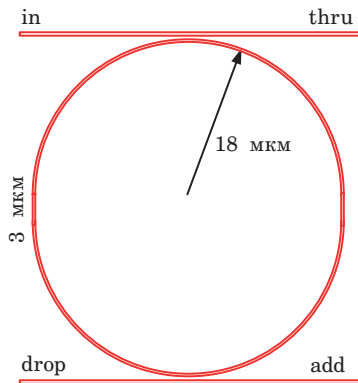
### Моделирование датчика жидкости на основе МКР

Разработанная модель безмаркерного микрорезонансного сенсора для анализа жидкостей показана на рис. 3. Датчик представляет собой кремниевый МКР со вставками прямых участков волновода на кольце на слое SiO<sub>2</sub>. В англоязычной литературе такая конструкция получила название racetrack за схожесть формы с гоночным треком. Методом FDTD при использовании ПО Ansys Lumerical был рассчитан сенсор МКР, который имел следующие геометрические параметры (в микрометрах): внешний радиус – 18; длина прямого участка racetrack – 3; зазор (in-through) –



0,18; зазор (add-drop) – 0,25; высота волновода – 0,22; толщина волновода – 0,4. Расчет проводился для TE-моды.

Как можно заметить, значения зазора (расстояния между прямым волноводом и кольцом МКР, *англ.* gap) для in-through- и add-drop-волноводов различаются. Подбор значения зазора для in-through- волновода производился на основе критерия критической связи (*англ.* coupling) волноводов [30, 31]. С использованием FDTD был произведен расчет затухания в кольце МКР и коэффициентов связи. Наиболее близким к выполнению условия критической связи оказалось значение зазора для in-through-волновода, равное 0,18 мкм. Наличие add-drop-



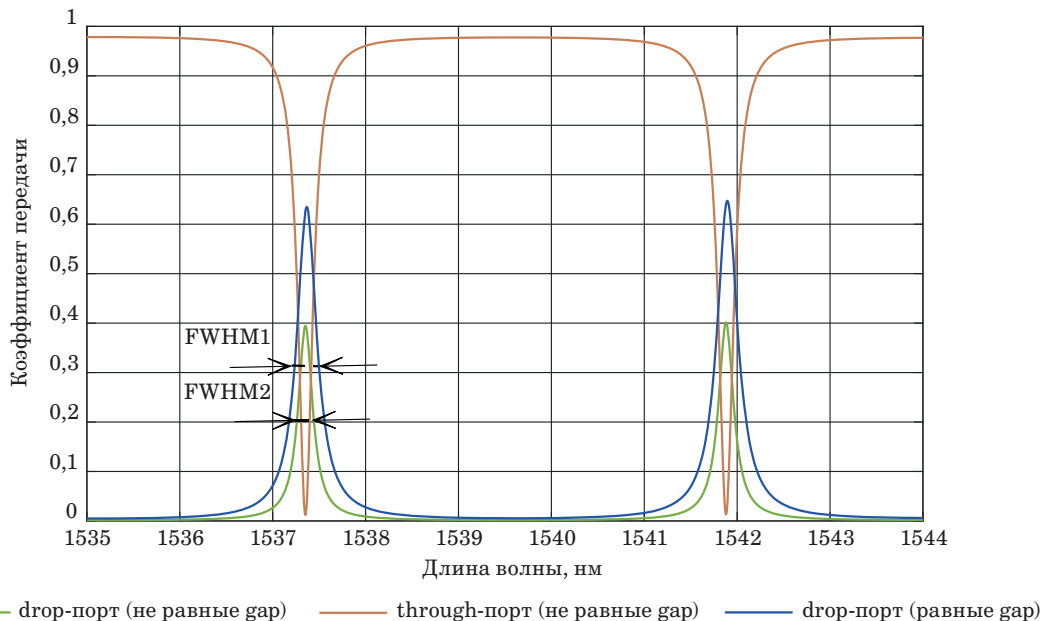
■ **Рис. 3.** Модель сенсора МКР формата racetrack  
 ■ **Fig. 3.** Racetrack MRR sensor scheme

волновода вносит в систему МКР дополнительное затухание, вызванное переходом энергии из кольца в drop-порт. Поэтому выбор значения зазора add-drop-волновода осуществлялся с учетом необходимости обеспечить высокую добротность в режиме, близком к критическому, позволяющем повысить чувствительность [30]. Резонансные свойства МКР оценивались по FWHM и добротности  $Q$  по формулам (1) и (4) с учетом того, что  $a = 0,971$ ;  $r_1 = 0,935$ ,  $r_2 = 0,961$ ;  $\lambda_{res} = 1537,36$  нм;  $L = 119,1$  мкм;  $n_g \sim 4,55$ ;  $n_{eff} \sim 2,21$ .

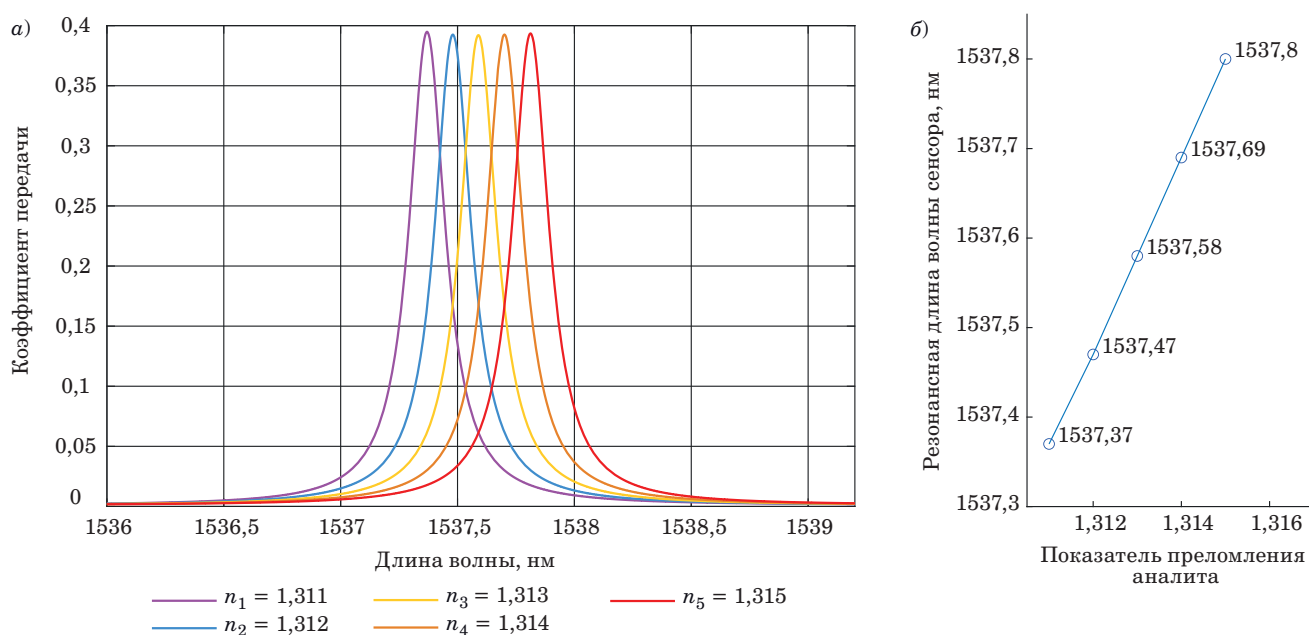
Как видно из спектров передачи на through- и drop-портах смоделированного сенсора (рис. 4), при равных значениях зазора (0,18 мкм) FWHM1 = 270 нм, а при отличающихся FWHM2 = 190 нм. Таким образом, увеличение зазора с add-drop-волноводом до 0,25 мкм снизило коэффициент связи и позволило уменьшить FWHM и обеспечить расчетную добротность  $Q \sim 8100$ . Дальнейшее увеличение зазора с add-drop-волноводом приводит к уменьшению мощности на drop-порте до значений, затрудняющих их регистрацию.

График (рис. 5, а) показывает смещение резонансной длины волны датчика на drop-порте при изменении ПП анализируемой жидкости (аналита)  $\Delta n_{ж}$ . При  $\Delta n_{ж} = 0,001$  значение  $\Delta\lambda$  между двумя соседними пиками составило 0,11 нм (рис. 5, б). Из полученных результатов было определено, что чувствительность сенсора

$$S = \Delta\lambda/\Delta n_{ж} = 110 \text{ нм/RIU}. \quad (7)$$



■ **Рис. 4.** АЧХ through- и drop-портов сенсора  
 ■ **Fig. 4.** Spectra of sensor's through- and drop-ports



■ **Рис. 5.** Зависимость спектра пропускания датчика МКР на drop-порте (а) и резонансной длины волны датчика (б) от ПП аналита

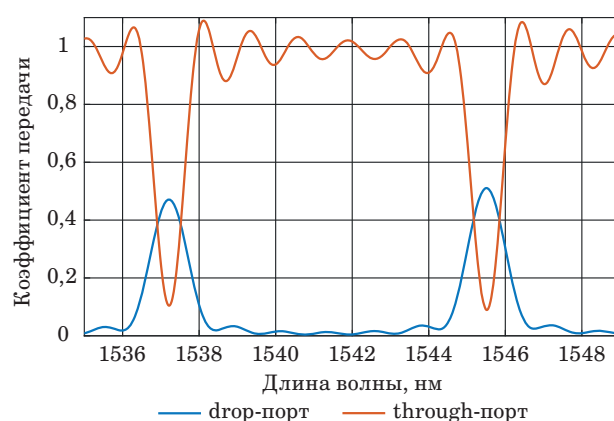
■ **Fig. 5.** The dependence of the sensor MRR transmission spectrum at the drop-port on the analyte RI (a) and resonant wavelength of the sensor on the analyte RI (b)

### Моделирование интеррогатора на основе МКР и результаты совместной схемы работы системы

Для отслеживания и фиксирования изменения резонансной длины волны датчика на ФИС предлагается интеррогация по амплитуде. Метод интеррогации по интенсивности заключается в интерпретации изменения резонансной длины волны в изменение мощности на выходе системы. В качестве интеррогатора была разработана модель микрокольцевого резонатора со следующими геометрическими параметрами (в микрометрах): внешний радиус – 10; зазор (in-through) – 0,1; зазор (add-drop) – 0,1; высота волновода – 0,22; толщина волновода – 0,4. АЧХ МКР представлена на рис. 6.

Исходя из критериев, приведенных в предыдущем разделе, были определены параметры МКР интеррогатора: добротность  $Q$  составила  $\sim 1700$ , а FWHM  $\sim 1,1$  нм. При сравнении АЧХ сенсора (см. рис. 4) и интеррогатора (см. рис. 6) получаем, что оба требования к сенсорной системе, приведенные в разделе «Архитектура и принцип действия предлагаемой сенсорной системы», выполняются.

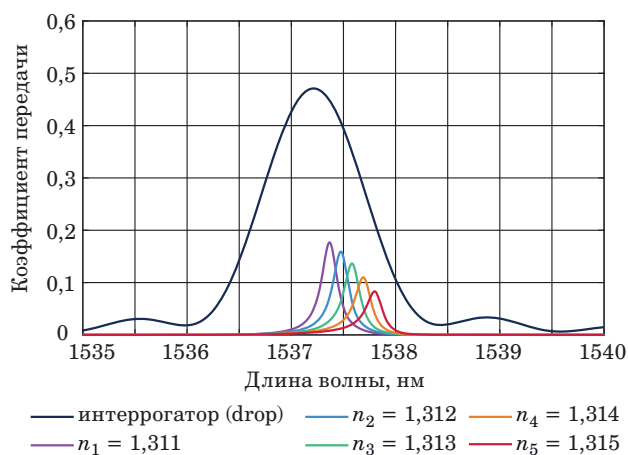
Моделирование совместной работы системы для отслеживания и фиксирования изменения резонансной длины волны проведено в соответствии со схемой (см. рис. 1) в среде Lumerical Interconnect. Показатель преломления анали-



■ **Рис. 6.** АЧХ through- и drop-портов интеррогатора

■ **Fig. 6.** Transmission spectrum of the through- and drop-ports of the interrogator

зируемого вещества изменялся от 1,311 до 1,315. Широкополосное излучение от источника мощностью 0 дБм, в качестве которого выступает ONA (optical network analyzer), поступает на in-порт сенсора, и при выполнении условия резонанса на его drop-порте появляется излучение. Диапазон длин волн излучения – от 1535 до 1550 нм. Это излучение попадает на in-порт интеррогатора. На рис. 7 показано, как изменяется интенсивность излучения на drop-порте интеррогатора при изменении  $n_{ж}$ . При совпадении резонансных длин волн у интеррогатора



■ **Рис. 7.** Спектр изменения коэффициента передачи сенсора в зависимости от разных ПП аналита

■ **Fig. 7.** Wavelength dependence of the sensor transmission coefficient for the different analyte RIs

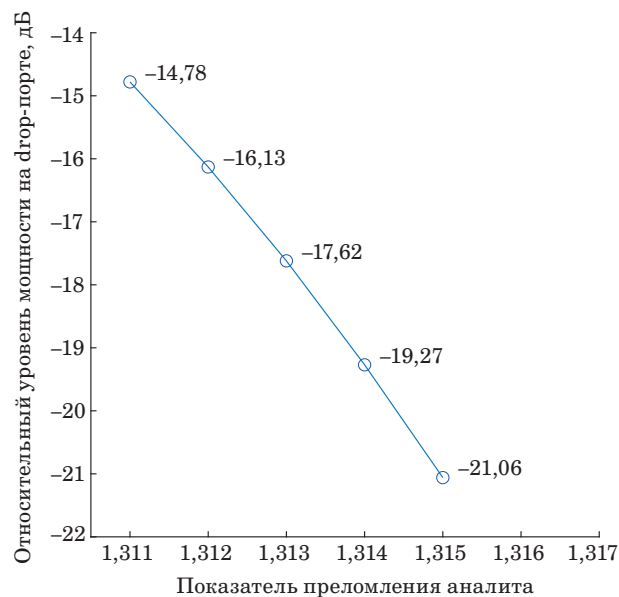
и сенсора на drop-порте интеррогатора будут максимальный коэффициент передачи и максимальная интенсивность оптического излучения, а при попадании резонанса сенсора на середину FSR интеррогатора коэффициент передачи будет минимальным, и все излучение пройдет на through-порт интеррогатора.

Для построения зависимости изменения относительной мощности на выходе схемы от  $n_{ж}$  сначала фиксировались интенсивности, поступающие на through- и drop-порты сенсора. Эти результаты для каждого порта отдельно были переведены в единицы электрической мощности с учетом чувствительности фотодетектора. Затем для каждого  $n_{ж}$  был рассчитан уровень относительной мощности на drop-порте по формуле (6). Результаты представлены на рис. 8.

Из графика видно, что изменение  $n_{ж}$  на 0,001 приводит к изменению регистрируемого параметра не менее чем на 1,35 дБ, что позволяет оценить чувствительность системы в целом по аналогии с формулой (7):

$$S = \Delta P / \Delta n_{ж} = 1350 \text{ дБ/RIU.}$$

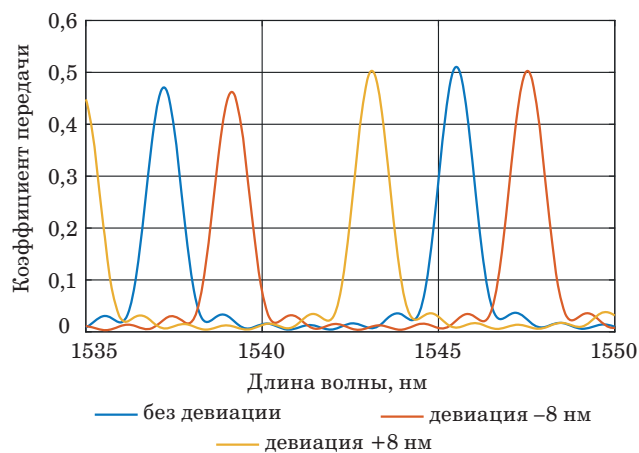
Необходимо отметить, что при изготовлении любой ФИС, в том числе сенсорной, могут возникать проблемы, связанные с девиацией ширины волновода. Эти погрешности воздействуют на производительность системы, поскольку девиация влияет на эффективный и групповой ПП волноводов и коэффициент связи в области каплинга у МКР. Согласно [32], стандартное отклонение ширины волновода на платформе SOI может достигать 3 нм в пределах одной пластины MPW (Multi-Project Wafer). Согласно [33], для разных пластин стандартное отклонение ширины



■ **Рис. 8.** Зависимость изменения относительной мощности на drop-порте от изменения ПП жидкости

■ **Fig. 8.** Dependence of the relative power at the interrogator drop-port on the analyte RI

волновода достигает 6,4 нм. Для максимального учета погрешностей доступных платформ были отдельно смоделированы МКР интеррогатора с девиацией габаритов волноводов +8 и -8 нм. Как видно из результатов моделирования (рис. 9), смещение пиков резонансов составило 2–2,5 нм, что значительно влияет на производительность системы, так как пики резонансов сенсора не попадут на нужный участок характеристики интеррогатора. Решить эту проблему можно подстройкой характеристики интерро-



■ **Рис. 9.** Спектральная характеристика МКР интеррогатора при девиации ширины волновода +/-8 нм

■ **Fig. 9.** Transmission spectrum of MRR interrogator at waveguide width deviation +/-8 nm

гатора с использованием УНЭ (см. рис. 1). С его помощью можно не только подстраивать характеристику интеррогатора под диапазон значений длин волн сенсоров, но и расширить границы измерения путем смещения спектральной характеристики опрашивающего МКР.

## Заключение

Предложена концепция совместной работы безмаркерного сенсора для анализа изменений ПП и интеррогатора для опроса указанного датчика. Выбор интеррогации по интенсивности обусловлен тем, что она проста в реализации, но при этом обеспечивает скорость опроса системы и разрешающую способность, достаточную для применения во многих областях, например в биомедицинских и промышленных приложениях. Для повышения чувствительности структуры приведены необходимые критерии калибровки двух МКР, благодаря которым

удалось достичь чувствительности системы 110 нм/RIU для датчика или 1350 дБ/RIU для системы в целом. Описанный способ измерения выходного сигнала дополнительно позволяет избавиться сенсорную систему от негативного влияния флуктуаций выходной мощности широкополосного источника излучения, что даст возможность существенно снизить требования к таким источникам и, как следствие, сложность и стоимость сенсорной системы.

## Финансовая поддержка

Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для ФГБОУ ВО «УГАТУ» (код научной темы #FEUE-2021-0013, соглашение № 075-03-2021-014) в молодежной научно-исследовательской лаборатории НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

## Литература

1. **Tai H., Wang S., Duan Z., Jiang Y.** Evolution of breath analysis based on humidity and gas sensors: Potential and challenges. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, vol. 318, 128104. Available at: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520304548?casa\\_token=KtnazLoMakoAAAAA:rKxSJAoDrlzgkKmangrtE7Zqsc92dSRa1vJowHo96TZEm-zHluewom7ythcoWQz9iYtjIY1A47x](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520304548?casa_token=KtnazLoMakoAAAAA:rKxSJAoDrlzgkKmangrtE7Zqsc92dSRa1vJowHo96TZEm-zHluewom7ythcoWQz9iYtjIY1A47x) (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.snb.2020.128104
2. **Asadzadeh S., de Oliveira W. J., de Souza Filho C. R.** UAV-based remote sensing for the petroleum industry and environmental monitoring: State-of-the-art and perspectives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, 109633. Available at: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521012675?casa\\_token=G2v7GZw0qdQA-AAAA:ACiF13W5hucm3sbu8M6B1EfuWZdfsyijdP-pvfLcIUctZyoFu1WvslfgLMLP75BKoa99Wn882WG-Wn](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521012675?casa_token=G2v7GZw0qdQA-AAAA:ACiF13W5hucm3sbu8M6B1EfuWZdfsyijdP-pvfLcIUctZyoFu1WvslfgLMLP75BKoa99Wn882WG-Wn) (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.petrol.2021.109633
3. **Arroyo P., Gómez-Suárez J., Herrero J. L., Lozano J.** Electrochemical gas sensing module combined with unmanned aerial vehicles for air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, vol. 364, 131815. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400522004579?via%3Dihub> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.snb.2022.131815
4. **Zhang Q., Zhou Q., Lu Z., Wei Z., Xu L., Gui Y.** Recent advances of SnO<sub>2</sub>-based sensors for detecting fault characteristic gases extracted from power transformer oil. *Front. Chem.*, 2018, vol. 6, 364. Available at: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fchem.2018.00364/full> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3389/fchem.2018.00364
5. **Kondalkar V. V., Park J., Lee K.** MEMS hydrogen gas sensor for in-situ monitoring of hydrogen gas in transformer oil. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 326, 128989. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520313368?via%3Dihu> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.snb.2020.128989
6. **Luan E., Shoman H., Ratner D. M., Cheung K. C., Chrostowski L.** Silicon photonic biosensors using label-free detection. *Sensors*, 2018, vol. 18, 3519. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3519> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3390/s18103519
7. **Ciminelli C., Dell'Olio F., Conteduca D., Armenise M. N.** Silicon photonic biosensors. *IET Optoelectronics*, 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 48–54. doi:10.1049/iet-opt.2018.5082
8. **Chandrasekar R., Lapin Z. J., Nichols A. S., Braun R. M., Fountain A. W.** Photonic integrated circuits for department of defense-relevant chemical and biological sensing applications: State-of-the-art and future outlooks. *Opt. Eng.*, 2019, vol. 58, 1. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-58/issue-02/020901/Photonic-integrated-circuits-for-Department-of-Defense-relevant-chemical-and/10.1117/1.OE.58.2.020901.full?S-SO=1> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1117/1.OE.58.2.020901
9. **Morais E., Pontes M. J., Marques C., Leal-Junior A.** Liquid level sensor with two FBGs embedded in a PDMS diaphragm: Analysis of the linearity and sensi-



- tivity. *Sensors*, 2022, vol. 22, 1268. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/1268> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3390/s22031268
10. **Yang D., Liu Y., Wang Y., Zhang T., Shao M., Yu D., Fu H., Jia Z.** Integrated optic-fiber sensor based on enclosed EFPI and structural phase-shift for discriminating measurement of temperature, pressure and RI. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 126, 106112. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399219313027?via%3Dihub> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.optlastec.2020.106112
  11. **Li H., An Z., Mao Q., Zuo S., Zhu W., Zhang S., Zhang C., Li E., Garcia J. D. P.** SOI waveguide bragg grating photonic sensor for human body temperature measurement based on photonic integrated interrogator. *Nanomaterials*, 2021, vol. 12, 29. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/1/29> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3390/nano12010029
  12. **Liu Y., Liu X., Zhang T., Zhang W.** Integrated FPI-FBG composite all-fiber sensor for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 111, pp. 167–171. doi:10.1016/j.optlaseng.2018.08.007
  13. **Vogelbacher F., Kothe T., Muellner P., Melnik E., Sagmeister M., Kraft J., Hainberger R.** Waveguide mach-zehnder biosensor with laser diode pumped integrated single-mode silicon nitride organic hybrid solid-state laser. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, vol. 197, 113816. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566321008538?via%3Dihub> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1016/j.bios.2021.113816
  14. **Sun X., Dai D., Thylén L., Wosinski L.** High-sensitivity liquid refractive-index sensor based on a mach-zehnder interferometer with a double-slot hybrid plasmonic waveguide. *Opt. Express*, 2015, vol. 23, pp. 25688–25699. doi:10.1364/OE.23.025688
  15. **Crespi A., Gu Y.** Three-dimensional Mach – Zehnder interferometer in a microfluidic chip for spatially-resolved label-free de-tection. *Lab Chip*, 2010, vol. 10, iss. 9, pp. 1167–1173. doi: 10.1039/B920062B
  16. **Wu S., Guo Y., Wang W., Zhou J., Zhang Q.** Label-free biosensing using a microring resonator integrated with poly-(dimethylsiloxane) microfluidic channels. *Review of Scientific Instruments*, 2019, vol. 90, 035004. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5074134> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1063/1.5074134
  17. **Gangwar R. K., Qin J., Wang X.** Porous silicon-based microring resonator for temperature and cancer cell detection. *Front. Phys.*, 2022, vol. 10, 929033. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2022.929033/full> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3389/fphy.2022.929033
  18. **Bahadoran M., Seyfari A. K., Sanati P., Chua L. S.** Label free identification of the different status of anemia disease using optimized double-slot cascaded microring resonator. *Sci Rep*, 2022, vol. 12, 5548. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-09504-2> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1038/s41598-022-09504-2
  19. **Zinoviev K., Carrascosa L. G., Sánchez del Río J., Sepúlveda B., Domínguez C., Lechuga L. M.** Silicon photonic biosensors for lab-on-a-chip applications. *Advances in Optical Technologies*, 2008, vol. 2008, 383927. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/aot/2008/383927/> (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.1155/2008/383927
  20. **Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T., De Vos K., Kumar Selvaraja S., Claes T., Dumon P., Bienstman P., Van Thourhout D., Baets R.** Silicon microring resonators. *Laser & Photon. Rev.*, 2012, vol. 6, pp. 47–73. doi:10.1002/lpor.201100017
  21. **Huang L., Yan H., Xu X., Chakravarty S., Tang N., Tian H., Chen R. T.** Improving the detection limit for on-chip photonic sensors based on subwavelength grating racetrack resonators. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, pp. 10527–10535. doi:10.1364/OE.25.010527
  22. **Wu N., Xia L.** Side-mode suppressed filter based on an angular grating-subwavelength grating microring resonator with high flexibility in wavelength design. *Appl. Opt.*, 2019, vol. 58, pp. 7174–7180. doi:10.1364/AO.58.007174
  23. **Zhao C. Y., Zhang L., Zhang C. M.** Compact SOI optimized slot microring coupled phase-shifted bragg grating resonator for sensing. *Optics Communications*, 2018, vol. 414, pp. 212–216. doi:10.1016/j.optcom.2018.01.010
  24. **Słowikowski M., Kaźmierczak A., Stopiński S., Bieniek M., Szostak S., Matuk K., Augustin L., Piramidowicz R.** Photonic integrated interrogator for monitoring the patient condition during MRI diagnosis. *Sensors*, 2021, vol. 21, 4238. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4238>. (дата обращения: 28.08.2022). doi:10.3390/s21124238
  25. **Yao J.** Microwave photonic sensors. *J. Lightwave Technol.*, 2021, vol. 39, pp. 3626–3637. doi:10.1109/JLT.2020.3047442
  26. **Tozzetti L., Bontempi F., Giacobbe A., Pasquale F. D., Faralli S.** Fast FBG interrogator on chip based on silicon on insulator ring resonator add/drop filters. *J. Lightwave Technol.*, 2022, vol. 40, pp. 5328–5336. doi:10.1109/JLT.2022.3174770
  27. **Chew S. X., Yi X., Yang W., Wu C., Li L., Nguyen L., Minasian R.** Optoelectronic oscillator based sensor using an on-chip sensing probe. *IEEE Photonics J.*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 1–9. doi:10.1109/JPHOT.2017.2671461
  28. **Yao J.** Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing. *J. Lightwave Technol.*, 2017, vol. 35, no. 16, pp. 3489–3497. doi:10.1109/JLT.2016.2586181
  29. **Yao J.** Photonic generation of microwave arbitrary waveforms. *Optics Communications*, 2011, vol. 284, pp. 3723–3736. doi:10.1016/j.optcom.2011.02.069

30. Milvich J., Kohler D., Freude W., Koos C. Integrated phase-sensitive photonic sensors: A system design tutorial. *Adv. Opt. Photon.*, 2021, vol. 13, pp. 584–642. doi:10.1364/AOP.413399

31. Cardenosa-Rubio M. C., Robison H. M., Bailey R. C. Recent advances in environmental and clinical analysis using microring resonator-based sensors. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, vol. 10, pp. 38–46. doi:10.1016/j.coesh.2019.09.001

32. Lu Z., Jhoja J., Klein J., Wang X., Liu A., Flueckiger J., Pond J., Chrostowski L. Performance pre-

diction for silicon photonics integrated circuits with layout-dependent correlated manufacturing variability. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, pp. 9712–9733. doi:10.1364/OE.25.009712

33. Siew S. Y., Li B., Gao F., Zheng H. Y., Zhang W., Guo P., Xie S. W., Song A., Dong B., Luo L. W., Li C., Luo X., Lo G.-Q. Review of silicon photonics technology and platform development. *J. Lightwave Technol.*, 2021, vol. 39, pp. 4374–4389. doi:10.1109/JLT.2021.3066203

UDC 681.586.5

doi:10.31799/1684-8853-2022-6-20-30

EDN: VOWUUQ

### Fully integrated optical sensor system with intensity interrogation

G. S. Voronkov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-8788-2696, voronkov.gs@ugatu.su

A. G. Zakoyan<sup>a</sup>, Student, orcid.org/0000-0002-6362-0755

V. V. Ivanov<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0002-4716-9466

A. V. Voronkova<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-7060-952X

I. V. Stepanov<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0003-4677-5808

E. P. Grakhova<sup>a</sup>, PhD, Tech., Acting Head of Labs, orcid.org/0000-0003-2207-2702

V. S. Lyubopytov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-1535-5341

R. V. Kutluyarov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-2724-6978

<sup>a</sup>Ufa University of Science and Technology, 32, Z. Validi St., Ufa, 450076, Russian Federation

**Introduction:** Today sensor systems based on integrated photonics devices are the most important branch of embedded information and control systems for various functions. The output characteristics of a sensor system are significantly determined by the efficiency of the interrogator. The intensity interrogator based on a microring resonator can provide a high scanning rate and sensitivity that meets the requirements of a wide range of applications. **Purpose:** To develop an effective sensor system composed of a refractometric sensor and an interrogator located on the same photonic integrated circuit for marker-free determination of the concentration of substances in liquids. **Methods:** We use the numerical simulation of electromagnetic field propagation in a waveguide system (integrated silicon waveguides on a silicon dioxide substrate) in the research. The simulation has been carried out using the Ansys Lumerical environment, the FDTD (Finite Difference Time Domain) solver. The parameters of the microring resonators were optimized to obtain the coupling coefficients between the waveguides, providing the operation in the critical coupling mode. **Results:** We propose the concept of a fully integrated photonic sensor system based on micro-ring add-drop resonators. A sensor based on microring resonators has been developed, which consists of two half-rings with a radius of 18 μm, connected by sections of straight waveguides 3 μm long. An interrogator represented by a microring resonator with a radius of 10 μm has been developed. According to simulation results with a broadband source, the achieved sensor sensitivity was 110 nm (or 1350 dB) per refractive index change. We propose a technique for choosing the optimal characteristics of the sensor and interrogator targeted to improve the complete system efficiency. **Practical relevance:** Sensor systems based on photonic integrated circuits can meet the demand for devices characterized by low power consumption, small size, immunity to electromagnetic interference and low cost.

**Keywords** — photonic integrated circuits, intensity interrogation, sensor, sensor system, microring resonator.

**For citation:** Voronkov G. S., Zakoyan A. G., Ivanov V. V., Voronkova A. V., Stepanov I. V., Grakhova E. P., Lyubopytov V. S., Kutluyarov R. V. Fully integrated optical sensor system with intensity interrogation. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 20–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-6-20-30, EDN: VOWUUQ

### Financial support

The research is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment for the FSBEI HE “USATU” (agreement No. 075-03-2021-014) and conducted in the research laboratory “Sensor systems based on integrated photonics devices” of the Eurasian Scientific and Educational Center.

### References

1. Tai H., Wang S., Duan Z., Jiang Y. Evolution of breath analysis based on humidity and gas sensors: Potential and challenges. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, vol. 318, 128104. Available at: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520304548?casa\\_token=KtnazLoMakoAAAAA:r-KxSJAoDrlzgzKkmangRtE7Zqsc92dSRa1vjow-Ho96TZEm-zHluewom7ythcoWQz9iYtjIY1A47x](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520304548?casa_token=KtnazLoMakoAAAAA:r-KxSJAoDrlzgzKkmangRtE7Zqsc92dSRa1vjow-Ho96TZEm-zHluewom7ythcoWQz9iYtjIY1A47x) (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.snb.2020.128104
2. Asadzadeh S., de Oliveira W. J., de Souza Filho C. R. UAV-based remote sensing for the petroleum industry and envi-

- ronmental monitoring: State-of-the-art and perspectives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, 109633. Available at: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521012675?casa\\_token=G-2v7GZw0qdQAAAAA:ACiF13W5hucm3sbu8M6B1EfuWZd-fsyijdPpvfLclUCtZyoFu1WvslfgLMLP75BKoa99Wn882W-GWn](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521012675?casa_token=G-2v7GZw0qdQAAAAA:ACiF13W5hucm3sbu8M6B1EfuWZd-fsyijdPpvfLclUCtZyoFu1WvslfgLMLP75BKoa99Wn882W-GWn) (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.petrol.2021.109633
3. Arroyo P., Gómez-Suárez J., Herrero J. L., Lozano J. Electrochemical gas sensing module combined with unmanned

- aerial vehicles for air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, vol. 364, 131815. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400522004579?via%3Dihub> (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.snb.2022.131815
4. Zhang Q., Zhou Q., Lu Z., Wei Z., Xu L., Gui Y. Recent advances of SnO<sub>2</sub>-based sensors for detecting fault characteristic gases extracted from power transformer oil. *Front. Chem.*, 2018, vol. 6, 364. Available at: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fchem.2018.00364/full> (accessed 28 August 2022). doi:10.3389/fchem.2018.00364
  5. Kondalkar V. V., Park J., Lee K. MEMS hydrogen gas sensor for in-situ monitoring of hydrogen gas in transformer oil. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 326, 128989. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400520313368?via%3Dihub> (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.snb.2020.128989
  6. Luan E., Shoman H., Ratner D. M., Cheung K. C., Chrostowski L. Silicon photonic biosensors using label-free detection. *Sensors*, 2018, vol. 18, 3519. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3519> (accessed 28 August 2022). doi:10.3390/s18103519
  7. Ciminelli C., Dell'Olivo F., Contedua D., Armenise M. N. Silicon photonic biosensors. *IET Optoelectronics*, 2019, vol. 13, iss. 2, pp. 48–54. doi:10.1049/iet-opt.2018.5082
  8. Chandrasekar R., Lapin Z. J., Nichols A. S., Braun R. M., Fountain A. W. Photonic integrated circuits for department of defense-relevant chemical and biological sensing applications: State-of-the-art and future outlooks. *Opt. Eng.*, 2019, vol. 58, 1. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-58/issue-02/020901/Photonic-integrated-circuits-for-Department-of-Defense-relevant-chemical-and/10.1117/1.OE.58.2.020901.full?S-SO=1> (accessed 28 August 2022). doi:10.1117/1.OE.58.2.020901
  9. Morais E., Pontes M. J., Marques C., Leal-Junior A. Liquid level sensor with two FBGs embedded in a PDMS diaphragm: Analysis of the linearity and sensitivity. *Sensors*, 2022, vol. 22, 1268. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/1268> (accessed 28 August 2022). doi:10.3390/s22031268
  10. Yang D., Liu Y., Wang Y., Zhang T., Shao M., Yu D., Fu H., Jia Z. Integrated optic-fiber sensor based on enclosed EFPI and structural phase-shift for discriminating measurement of temperature, pressure and RI. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 126, 106112. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399219313027?via%3Dihub> (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.optlastec.2020.106112
  11. Li H., An Z., Mao Q., Zuo S., Zhu W., Zhang S., Zhang C., Li E., García J. D. P. SOI waveguide bragg grating photonic sensor for human body temperature measurement based on photonic integrated interrogator. *Nanomaterials*, 2021, vol. 12, 29. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/1/29> (accessed 28 August 2022). doi:10.3390/nano12010029
  12. Liu Y., Liu X., Zhang T., Zhang W. Integrated FPI-FBG composite all-fiber sensor for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, vol. 111, pp. 167–171. doi:10.1016/j.optlaseng.2018.08.007
  13. Vogelbacher F., Kothe T., Muellner P., Melnik E., Sagmaister M., Kraft J., Hainberger R. Waveguide mach-zehnder biosensor with laser diode pumped integrated single-mode silicon nitride organic hybrid solid-state laser. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, vol. 197, 113816. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566321008538?via%3Dihub> (accessed 28 August 2022). doi:10.1016/j.bios.2021.113816
  14. Sun X., Dai D., Thylén L., Wosinski L. High-sensitivity liquid refractive-index sensor based on a mach-zehnder interferometer with a double-slot hybrid plasmonic waveguide. *Opt. Express*, 2015, vol. 23, pp. 25688–25699. doi:10.1364/OE.23.025688
  15. Crespi A., Gu Y. Three-dimensional Mach – Zehnder interferometer in a microfluidic chip for spatially-resolved label-free detection. *Lab Chip*, 2010, vol. 10, iss. 9, pp. 1167–1173. doi:10.1039/B920062B
  16. Wu S., Guo Y., Wang W., Zhou J., Zhang Q. Label-free biosensing using a microring resonator integrated with poly-(dimethylsiloxane) microfluidic channels. *Review of Scientific Instruments*, 2019, vol. 90, 035004. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5074134> (accessed 28 August 2022). doi:10.1063/1.5074134
  17. Gangwar R. K., Qin J., Wang X. Porous silicon-based microring resonator for temperature and cancer cell detection. *Front. Phys.*, 2022, vol. 10, 929033. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2022.929033/full> (accessed 28 August 2022). doi:10.3389/fphy.2022.929033
  18. Bahadoran M., Seyfari A. K., Sanati P., Chua L. S. Label free identification of the different status of anemia disease using optimized double-slot cascaded microring resonator. *Sci Rep*, 2022, vol. 12, 5548. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-09504-2> (accessed 28 August 2022). doi:10.1038/s41598-022-09504-2
  19. Zinoviev K., Carrascosa L. G., Sánchez del Río J., Sepúlveda B., Domínguez C., Lechuga L. M. Silicon photonic biosensors for lab-on-a-chip applications. *Advances in Optical Technologies*, 2008, vol. 2008, 383927. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/aot/2008/383927/> (accessed 28 August 2022). doi:10.1155/2008/383927
  20. Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T., De Vos K., Kumar Selvaraja S., Claes T., Dumon P., Bienstman P., Van Thourhout D., Baets R. Silicon microring resonators. *Laser & Photon. Rev.*, 2012, vol. 6, pp. 47–73. doi:10.1002/lpor.201100017
  21. Huang L., Yan H., Xu X., Chakravarty S., Tang N., Tian H., Chen R. T. Improving the detection limit for on-chip photonic sensors based on subwavelength grating racetrack resonators. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, pp. 10527–10535. doi:10.1364/OE.25.010527
  22. Wu N., Xia L. Side-mode suppressed filter based on angular grating-subwavelength grating microring resonator with high flexibility in wavelength design. *Appl. Opt.*, 2019, vol. 58, pp. 7174–7180. doi:10.1364/AO.58.007174
  23. Zhao C. Y., Zhang L., Zhang C. M. Compact SOI optimized slot microring coupled phase-shifted bragg grating resonator for sensing. *Optics Communications*, 2018, vol. 414, pp. 212–216. doi:10.1016/j.optcom.2018.01.010
  24. Słowikowski M., Kaźmierczak A., Stopiński S., Bieniek M., Szostak S., Matuk K., Augustin L., Piramidowicz R. Photonically integrated interrogator for monitoring the patient condition during MRI diagnosis. *Sensors*, 2021, vol. 21, 4238. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4238> (accessed 28 August 2022). doi:10.3390/s21124238
  25. Yao J. Microwave photonic sensors. *J. Lightwave Technol.*, 2021, vol. 39, pp. 3626–3637. doi:10.1109/JLT.2020.3047442
  26. Tozzetti L., Bontempi F., Giacobbe A., Pasquale F. D., Faralli S. Fast FBG interrogator on chip based on silicon on insulator ring resonator add/drop filters. *J. Lightwave Technol.*, 2022, vol. 40, pp. 5328–5336. doi:10.1109/JLT.2022.3174770
  27. Chew S. X., Yi X., Yang W., Wu C., Li L., Nguyen L., Minasian R. Optoelectronic oscillator based sensor using an on-chip sensing probe. *IEEE Photonics J.*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 1–9. doi:10.1109/JPHOT.2017.2671461
  28. Yao J. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing. *J. Lightwave Technol.*, 2017, vol. 35, no. 16, pp. 3489–3497. doi:10.1109/JLT.2016.2586181
  29. Yao J. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms. *Optics Communications*, 2011, vol. 284, pp. 3723–3736. doi:10.1016/j.optcom.2011.02.069
  30. Milvich J., Kohler D., Freude W., Koos C. Integrated phase-sensitive photonic sensors: A system design tutorial. *Adv. Opt. Photon.*, 2021, vol. 13, pp. 584–642. doi:10.1364/AOP.413399
  31. Cardenosa-Rubio M. C., Robison H. M., Bailey R. C. Recent advances in environmental and clinical analysis using microring resonator-based sensors. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2019, vol. 10, pp. 38–46. doi:10.1016/j.coesh.2019.09.001
  32. Lu Z., Jhoja J., Klein J., Wang X., Liu A., Flueckiger J., Pond J., Chrostowski L. Performance prediction for silicon photonics integrated circuits with layout-dependent correlated manufacturing variability. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, pp. 9712–9733. doi:10.1364/OE.25.009712
  33. Siew S. Y., Li B., Gao F., Zheng H. Y., Zhang W., Guo P., Xie S. W., Song A., Dong B., Luo L. W., Li C., Luo X., Lo G.-Q. Review of silicon photonics technology and platform development. *J. Lightwave Technol.*, 2021, vol. 39, pp. 4374–4389. doi:10.1109/JLT.2021.3066203





UDC 004.05

doi:10.31799/1684-8853-2022-6-31-40

EDN: OOCYPQ

## Backend Bug Finder – a platform for effective compiler fuzzing

D. S. Stepanov<sup>a</sup>, Senior Lecturer, [orcid.org/0000-0003-1719-0325](https://orcid.org/0000-0003-1719-0325)

V. M. Itsyson<sup>a</sup>, PhD, Tech., Professor, [orcid.org/0000-0003-0276-4517](https://orcid.org/0000-0003-0276-4517), [vlad@icc.spbstu.ru](mailto:vlad@icc.spbstu.ru)

<sup>a</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikheskaia St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The standard way to check the quality of a compiler is manual testing. However, it does not allow to cover a vast diversity of programs that can be written in a target programming language. Today, in addition to manual written tests there are many automated compiler testing methods, among which fuzzing is one of the most powerful and useful. A compiler fuzzer is a tool that generates a random program in a target language and checks how the compiler works in this language. **Purpose:** To develop a platform for compiler fuzzing and, based on it, to develop a tool for Kotlin compiler testing. **Results:** We have developed Backend Bug Finder which is a platform for compiler fuzzing is. We have chosen a mutation-based approach as a method for generating random programs. First, an existing program is entered to the mutator as the input to be then transformed in some way. Mutations can be both trivial, for example, replacing arithmetic operators with others, and complex, changing the structure of the program. Next, the resulting program is fed to the input of the compiler with the following check of its operation. The developed test oracle can detect three types of errors: crashes, miscompilations, and performance degradations. If an error is detected, the test case is fed into the post-processing module, where reduction and deduplication algorithms are applied. We have developed a tool for fuzzing the Kotlin language compiler based on the platform for its approbation, which showed the applicability of the proposed approach for finding errors in modern compilers. **Practical relevance:** Over a year and a half of work, our tool has found thousands of different Kotlin compiler bugs, more than 200 of which were sent to the developers, and more than 80 have been fixed.

**Keywords** – fuzzing, compiler testing, compiler test generation, Kotlin, mutational fuzzing.

**For citation:** Stepanov D. S., Itsyson V. M. Backend Bug Finder – a platform for effective compiler fuzzing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 31–40. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-31-40, EDN: OOCYPQ

### Introduction

Often, software developers are faced with situations when their programs do not compile, run abnormally slowly, or not as they should. Sometimes these problems are results of compiler errors: bug trackers of popular compilers (clang, gcc, javac, etc.) contain tens of thousands of bugs found by users. The quality and reliability of compilers is the primary target of language development teams. For example, in the Kotlin (<https://kotlinlang.org/>) compiler project bug tracker at the beginning of February 2022 there are 30,256 issues (<https://youtrack.jetbrains.com/issues?q=%23Kotlin>). Most of them were found by users of the language, who, with each error they find, feel less and less desire to work with the compiler. Despite the huge number of manually written tests, compiler developers and testers cannot cover all the use cases of the language, since the number of possible programs is infinite.

How can we try to reduce the number of errors faced by compiler users? This is where the methods of automatic testing of compilers can help us, one of the most popular of which is fuzzing. Fuzzing was invented in 1988 at a Barton Miller seminar at the University of Wisconsin [1]. Fuzzer was a program that generated random sequences of characters and fed them to the input of UNIX command line utilities and see if the program crashed on the generated data

or not. It means that the compiler fuzzer should generate correct random programs in the target language and check whether they will be compiled correctly.

In this paper we are presenting a platform for compiler fuzzing, named Backend Bug Finder (BBF) and the implementation on its basis of the Kotlin compiler fuzzer. This tool is designed to find bugs related to the correct work of the compiler, and to its performance. Our fuzzer is mutational, it takes manually written code as input and tries to modify it in a non-trivial way. In addition to the test generation, BBF implements algorithms for bugs post-processing: deduplication and reduction. The results of the tool are highly appreciated by the language development team and are useful in practice.

### Related works

Even before the fuzzing was coined, there were various attempts to automatically test compilers with randomly generated programs as early as 50 years ago. This section discusses the development of compiler fuzzing area, as well as the most popular approaches and tools. Comprehensive overview of the compiler testing area is given in the article by Chen J. et al. [2].

The purpose of any compiler fuzzer is to generate a random, non-trivial, correct program and check



the compiler's work on it. Why should generated programs be non-trivial? Because bugs in all trivial programs have long been fixed. And as the compiler develops, the complexity of error-containing programs increases. Why do generated programs need to be correct? A syntactically incorrect program can only test the parser. Semantically incorrect ones can find compiler errors, but in practice such cases will never occur and fixing such bugs will not lead to a significant improvement in the quality of the compiler. So automatic program generation for compiler testing is a big problem. All approaches for production of compiler tests can be divided into two groups: generative and mutational ones. It follows from the titles that generative approaches try to generate programs in some way, while mutational approaches modify existing ones.

At the beginning of the development of the compiler fuzzing area, the most obvious and simple approach was implemented: the generation of code based on grammar. Purdom implemented such a generator in his work [3]. The algorithm consists in iterating by the production rules of grammar, and trying to compile the resulting code. This approach is suitable only for testing parsers, since almost all the code obtained in such a way is semantically incorrect. After that, various researchers introduced improved types of grammars, which allowed to add semantic rules into the generation process (affix, attribute, W-grammars) [4–6]. Unfortunately, for modern programming languages, none of them allows to generate non-trivial, semantically correct programs.

The work of Kreutzer P. et al. [7] can be considered as one of the modern grammar-based approaches. The authors presented a language for describing attribute grammars that contain both syntactic and semantic rules of the target programming language in a declarative way. The disadvantage of this approach is that in practice, it is hardly possible to write such grammar covering all modern language features and ways of their interaction. Therefore, in practice, it is limited to a small subset of the language.

In addition to grammar-based approaches, there are methods that somehow use grammar to improve the generation process (grammar-aided approaches). The most famous grammar-aided tool is CSmith [8], designed for testing C/C++ compilers. The difference between this tool and the approaches described above is that the program generation rules are described manually in the source code. The generation process consists of creating a set of data structures and the main function, which contains various scenarios of their use. Each generation step uses a grammar to understand which production rule can be applied and performs a set of checks to ensure that the resulting program is

correct and free from undefined behavior. Over the years, the tool has found a large number of bugs in the GCC and Clang compilers, which greatly helped the developers.

Besides of the mentioned, there are a huge number of generative approaches that implement various ideas, for example, deriving generation rules from existing code in the target programming language [9], using machine learning [10], testing certain compiler features in programming language compilers by writing a generator of the necessary expressions [11], etc.

As was written earlier, in addition to generative approaches, there are also mutational approaches. They differ from generative ones in that they use an existing program in the target programming language as an initial seed and try to somehow modify part of it to get a new one. Mutational approaches are divided into two groups: preserving and not preserving the original semantics.

Semantic-preserving mutational approaches are based on the equivalence modulo inputs [12]. The main idea of equivalence modulo inputs is that two programs are equivalent to each other under a set of input data if for each input of the set their behavior is the same. It means that mutations by construction should produce code that is semantically equivalent to the original one. Next, we check that programs that are syntactically different but semantically equivalent actually work the same way. Examples of such mutations can be different: changes to dead code that are not affected during program execution, or, conversely, its insertion. A more difficult example can be various options for replacing random expressions in a program with equivalent ones. Despite the shown efficiency and usefulness, this type of mutation is not intended for full-fledged testing of compilers, because it is very limited.

Non-semantic-preserving mutations are those that change the semantics of the program. It can be anything: replacing the signs of arithmetic expressions, variables renaming, changing the class hierarchy, etc. Such mutations do not guarantee the semantic correctness of the resulting program, so after each mutation it should be checked, and, in case of incorrectness, it is necessary to roll back to the previous correct state. Non-semantic-preserving mutations can be performed on different types of code representation: text, abstract syntax tree (AST), control flow graph, etc. For example, Chen et al. in their work [13] successfully used 129 non-semantic-preserving mutations to test various Java Virtual Machine (JVM) implementations and found more than 50 bugs in it. Another good example is Holler's work on finding vulnerabilities in the JavaScript (JS) interpreter of Mozilla Firefox [14]. The main idea is to replace non-terminal sym-

bols with non-terminals of the same type, but from other programs. In order to increase the probability of producing correct code, the authors implemented a set of heuristics, such as changing variable names, etc.

As can be seen from this section, compiler testing is a very big and practically useful scientific area separate from classic fuzzing. Each of the tools given as an example found a big number of errors. Ideally, a compiler fuzzer should be used in the development of any programming language, regardless of the approach that it implements, as practice shows, it will find some errors and help users to use the programming language more safely. Unfortunately, almost all tools are designed to test a specific programming language or even specific compiler, so creating one for Kotlin is an actual task.

### BBF in detail

Backend Bug Finder is a platform for finding bugs in the programming languages compilers. Its development began in 2019 and is still ongoing. Project is open source and available on Github (<https://github.com/DaniilStepanov/bbfgradle>). In this section we will consider in detail its structure and operation principle: from methods for producing test cases to post-processing of results.

### BBF overview

Our platform for compiler fuzzing (Fig. 1) consists of a number of components. In this section, we will consider the purpose and algorithm of each of them.

*Test generator* is responsible for test generation. From all the existing approaches, we decided to implement non-semantic-preserving mutations that are applied in random order to a random test from the initial test suite. The output of the test generator is a mutant program to check the correctness of the compiler. The mutation process is directed using the information received from the compilation checker, which allows one to understand that the current mutant is incorrect or meaningless and do not work with it further.

A component called *compilation checker*, also known as a test oracle, is responsible for exchanging information with the compiler. The input for this component is a mutant program, which it sends to the compiler for execution and analyzes the output, which is then passed to the test generator to direct its work. If a bug was found, then it is transferred to the bug manager for post-processing.

*Bug manager* is the component responsible for the found bugs post-processing. Usually, it includes algorithms for deduplication, reduction and isolation of errors. The output of this component is a well-formatted and minimized test containing a bug previously not found in the compiler, ready to be automatically or manually submitted to the appropriate bug tracker.

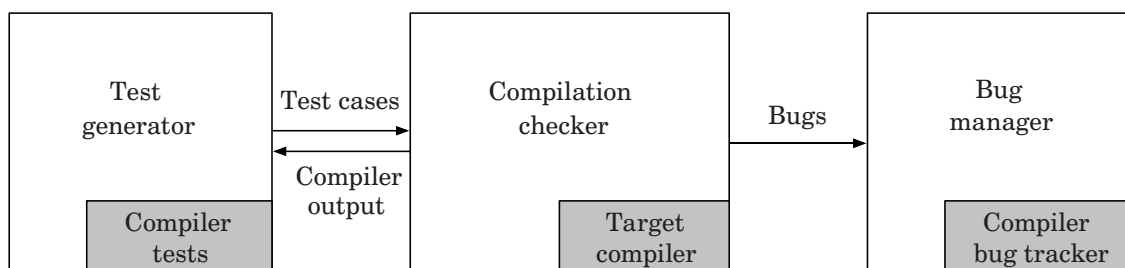
### Test generator

As mentioned earlier, non-semantics-preserving mutations were chosen for implementation in the BBF. The grammar-based approach is not very suitable for testing common language compilers due to their complexity. A large number of different features are implemented in the language, and manual description of the rules for its generation requires too much time with no guarantee of results.

Mutations in the BBF can be as diverse as possible: from simple ones like swap random lines or replace plus to minus to complicated mutations with class hierarchy modifications. In addition to such mutations, the platform also provides the ability to write partial generation: for example, random functions or classes.

All mutations are applied in random order and with different probabilities to provide a variety of resulting mutants. It is important to note that since our mutations do not guarantee the preservation of the semantics and correctness of the test, after each of them a check is necessary: if the resulting mutant is incorrect, a rollback to the previous state is performed. We get such information from the oracle after compilation and execution of the obtained mutant.

As input, the test generator takes a random test from the compiler's test seed, which is usually manually written by developers or testers. To improve



■ Fig. 1. Backend Bug Finder overview

the quality of fuzzing, they should be diverse and cover all language features and constructions. All tests must have a single structure: at the beginning, a set of various data structures, functions, and other top-level objects is defined, after which a function is declared that contains different scenarios for using the previously described components.

Mutations can be performed over two types of source code representation: textual and abstract syntax tree (AST). The textual representation can be used for simple mutations using regular expressions or line-level modifications. The AST is used for more complex transformations, such as changing the structure and architecture of tests. For example, when modifying a function argument, you have to modify all the call places. To improve the mutation process, the AST can be extended with various semantic information obtained from code analysis: types, descriptors, and so on.

### Compilation checker

The compilation checker is used to determine that the compiler is not working correctly. To do this, the program obtained from the test generator is compiled and executed, after which the result of compiler work is analyzed. In terms of fuzzing, the compiler is a program under test (PUT) and the compilation checker is a test oracle. According to the type of information received from the compiler, test oracles are divided into black-box, gray-box and white-box. In the case of black-box oracle, we only get information from the program I/O stream, which does not allow us to direct the fuzzing process in any way. The gray-box oracle receives additional information from the PUT, usually its coverage, which is then used to target the fuzzing process to cover necessary source code. In white-box testing, a PUT model is built, on which symbolic execution methods are used to generate new input test data.

In terms of getting information from the compiler, BBF is a black-box fuzzer — we work only with the information received from compiler I/O. The generation of tests for compiler testing is very different from generation of not structured input data for other programs, and in the case of target compiler testing, using coverage information as in general fuzzing will not give an increase in testing quality. Also, practice shows that prioritization of various mutations also does not increase the quality of common compiler fuzzing. Work on using compiler coverage information to improve the quality of target fuzzing is one of the directions for future work.

Regarding the types of bugs we are searching for, compilers are large and diverse software projects, so errors are not limited to crashes. This section discusses the types of bugs we are looking for and how we detect them.

Compiler crashes are the most common and easily detected kind of errors. To find bugs of this type, we just need to parse the message that the compiler ends with. This type of error occurs most often. With such an error, you will not be able to run the resulting code, because the compiler for some reason could not compile it.

The next type of bug is much more dangerous and is called “miscompilation”. This situation occurs when the compiler works correctly, but the behavior of the program does not correspond to the semantics of the language. To search for this type of errors we need to compile the program with different compilers (or different versions or modes of the same compiler), instrument the compiled code and check its behavior at runtime. If the behavior of the program compiled in one of the modes or by one of the compilers differs from the others, then at least we have found an interesting situation, and as a maximum this situation turns out to be a bug.

Last but not least are performance bugs. This type of error is associated either with too long compilation time, or, more seriously, with abnormally high execution time. Such errors are also detected using the “voting” system, but the whole difficulty lies in measuring the program running time, since the measurement error usually makes it difficult to separate bugs from false positives. BBF deals with such situations by adjusting the number of test runs until the measurement error becomes negligible.

Of course, considered bug types list is not final. The types of bugs to be found are limited only by the developer’s imagination. As a part of the project, work was done to find errors in the Kotlin language compiler plugin, in application binary interface, certain components of the compiler, etc.

### Bug manager

Practice shows that without this component it is impossible to effectively test the compiler. For example, usually, in a few hours of work, fuzzer finds more than a hundred bugs, almost all of which are duplicates. In addition to a large number of duplicates, test cases that lead to an error contain a large amount of irrelevant information, the manual removal of which takes a lot of time. It means that any fuzzing platform should contain post-processing algorithms. They typically include reduction, deduplication, and isolation algorithms.

Reduction is designed to remove information irrelevant to error from the test. Practice shows that most often the minimized test takes less than 10 lines, while the generated one is many times larger. To reduce tests in BBF, we implemented a hybrid approach: several language-agnostic methods and infrastructure to implement language-specific transformations. Language-specific transformations are intended for complex changes in the structure of the code that can-

not be done using automatic methods, for example, when removing a function argument, you must remove it in all call sites. Transformations run one after another until the test is no longer minimized. Reducer overview is shown in Fig. 2.

Hierarchical delta debugging [15] and static backward slicing [16] were chosen as language-independent methods that remove most of information irrelevant to error. The hierarchical delta debugging algorithm is based on the idea that on each level of the AST, representing the code with a bug, we are looking for the minimum set of vertices on which the desired error continues to be reproduced, and the vertices that do not affect this are deleted.

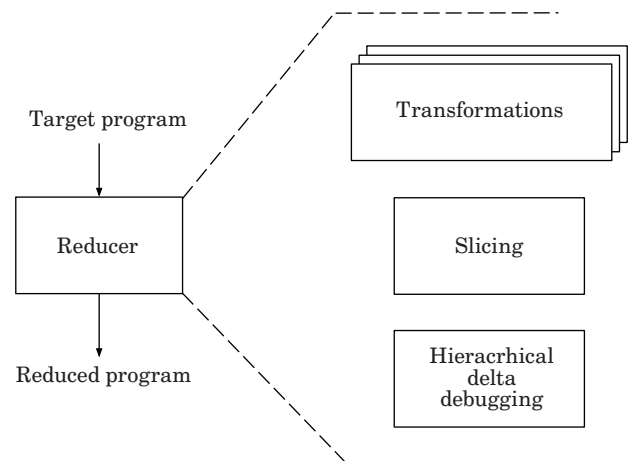
Slicing creates a program slice that contains only code that affects a slicing criterion. In our case, the slicing criteria are the variables found in the line of the test that contains the error. There are several types of slicing with different complexity and quality of work, we chose static backward slicing, which works at the intraprocedural, function and class levels.

As a result, the reduction algorithm removes significant amount of information irrelevant to the bug and greatly improves the manual processing of fuzzing results.

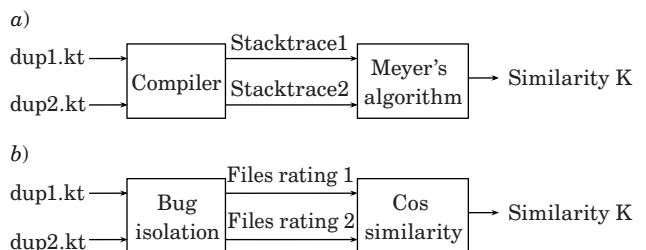
Practice of applying any compiler fuzzing shows that without deduplication, manual processing of found bugs takes too much time. It should be noted that the algorithms described in this section do not completely solve the problem of duplicates, allowing both false-positive and false-negative situations, but still significantly reduce the time of manual processing of results.

The first idea that comes to mind for filtering duplicates is that the same bugs have similar stacktraces. So, we decided to compare them. For this purpose, we are using Myer's difference algorithm [17]. The result of the algorithm is a similarity coefficient ( $0 \leq k \leq 1$ ). If the coefficient exceeds a previously empirically selected threshold, then the bugs are considered duplicates. Algorithm is shown in Fig. 3, *a*.

As is clear from the description, stacktraces are required for this algorithm to work, but they are available only in case of a compiler crash. What about other types of bugs when we don't have anything to compare? The solution to this problem lies in the scientific field called "Bug Isolation" [18]. The task of bug isolation algorithms is to determine the place in the source code of the PUT, which is the cause of the error. The result of the algorithm is a set of files sorted by the probability of containing bug in it. The main idea of our method is the hypothesis that bugs are duplicates if they are in the same place in the compiler source code. To determine the source of the error, the method of generating witness programs described in the article by



■ Fig. 2. Reducer overview



■ Fig. 3. Bug deduplication algorithms: *a* – using stacktraces comparison; *b* – using bug isolation techniques

Chen et al. [19] is used. Scheme of the algorithm is shown in Fig. 3, *b*.

### Kotlin compiler fuzzing tool implementation

Based on the platform described in the previous section, we have implemented a tool for the Kotlin compiler fuzzing. In this section we would like to discuss some of the more interesting implementation details.

#### Working with Kotlin

To implement our tool, we need to be able to build a structural representation of Kotlin code, be able to modify it, and also effectively test the compiler on it. All the necessary tools are already implemented inside the Kotlin compiler, so we decided to build a tool on top of it. In order not to be part of a huge project, we decided to use the necessary compiler modules as libraries. However, this solution also has a drawback –when updating the compiler version, the versions of the libraries do not always remain compatible, which makes the update impossible.



The compiler infrastructure also allows us to use the Program Structure Interface (PSI) trees (<https://plugins.jetbrains.com/docs/intellij/psi.html>) – traditional concrete syntax tree implementation used in JetBrains IntelliJ Platform. PSI is a standard way of representing structured code inside a Kotlin compiler. In addition to syntactic information, the tree contains information obtained from code analysis: types, descriptors, and so on. PSI makes it easier to perform the modification of the code and allows you to make changes that cannot be made with only syntactic information.

Also, using the compiler as a library makes it possible to compile code much more efficiently due to the lack of overhead for running compilation externally. But it is worth noting that in the case of the Kotlin compiler, after a few hours it starts to work more and more slowly, so sometimes the fuzzing process needs to be restarted.

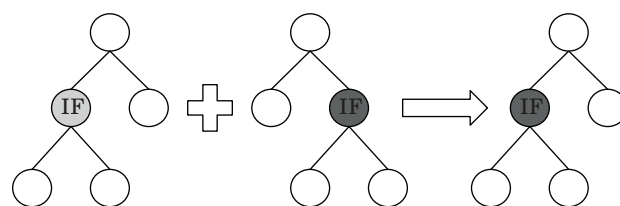
### Test generator implementation

For the Kotlin language we have implemented more than 50 mutations that are performed over two types of code representation: text and PSI. In this section, examples of interesting and diverse mutations will be given; a complete list can be found in the source code of the tool. To improve the mutation process, a random type generator and a generator of random expressions of the given types were implemented. It is also possible to work with the Kotlin standard library or use external ones.

The initial seed for the test generator is tests for the Kotlin compiler, written manually by the developers (<https://github.com/JetBrains/kotlin>). There are quite a lot of them (6000+), they are diverse and cover all language features and constructions. Tests have a single structure: at the beginning, a set of various data structures, functions, and other top-level objects is defined, after which a function named *box* is declared that contains different scenarios for using the previously described components.

#### PSI modifier

This mutation is designed to modify the PSI without using any semantic information. Nodes in the tree can be swapped, added, removed, or changed to nodes of the same type from other tests. Let's consider the last item in more details. An example of such an operation is shown in Fig. 4. For this mutation to work, first of all, it is necessary to collect a database of trees and their node types. After that, we take a random test case, select a random node and search for nodes of the same type from other tests, take a random one and try to make a replacement: if the resulting test turns out to be correct, then we accept the transformation and continue to



■ Fig. 4. Example replacing of PSI node to the node from another tree

mutate the new test, if not, we roll back to the previous state.

#### Expression replacer

This transformation selects a random expression and replaces it with another of the same type that is available in the current scope. The expression we are replacing can be a property, a parameter, a local variable, or a function call that returns a value of the compatible type. An example of applying this transformation is shown in Fig. 5. The original program P1 is shown in Fig. 5, a, suppose we choose to replace the *b* property initializer of type *Int* shown in Fig. 5, b. Further, for the place where the change will be made, we calculate the scope, for example, this will be *a* and result of calling the *getSum* function. After that, we select a random element of the same type from the scope and make a replacement. However, when choosing *getSum*, we need to generate a call to this function. And when generating a call, variables from the current scope can also be used. The generation result is shown in Fig. 5, c.

```

a) fun getSum(a: Int, b: Int) = a + b

fun box(): String {
    val a = 1
    val b = 1
    return if (a == b) "OK" else "ERROR"
}

b) fun getSum(a: Int, b: Int) = a + b

fun box(): String {
    val a = 1
    val b = [Int]
    return if (a == b) "OK" else "ERROR"
}

c) fun getSum(a: Int, b: Int) = a + b

fun box(): String {
    val a = 1
    val b = getSum(a, 9)
    return if (a == b) "OK" else "ERROR"
}
    
```

■ Fig. 5. Expression replacer mutation example: a – P1; b – P2; c – P3

*Random component generator*

This transformation represents the generative part of the tool. To increase the diversity and complexity of tests, a generator of random data structures was implemented. This generator allows you to create interfaces, abstract classes, objects and standard classes of all kinds. A class can contain properties, functions, or nested classes. They can also be inherited from others while maintaining code correctness. To implement this generator, a random type generator was also implemented, which takes into account the context and the Kotlin standard library. Generation of non-trivial function bodies is a complex and time-consuming task and one of the primary directions of future work. An example of the generated class is shown in Listing 1. In addition to adding classes, the generator can insert various properties and functions into existing classes.

Listing 1. Example of generated class

```
open class A {
    private val a: Int = 1
    public inline val b: List<Int>
        get() = listOf()
    open fun c(): A = TODO()
    inner class B : A() {
        val a: Double = 0.0
        override fun c(): A = A()
    }
}
```

**Compilation checker**

To implement an oracle for the Kotlin compiler, first we need to understand what we are testing, what kind of errors we can look for and how to detect them. The main platform for Kotlin compiler is the JVM, but there are also backends that allow

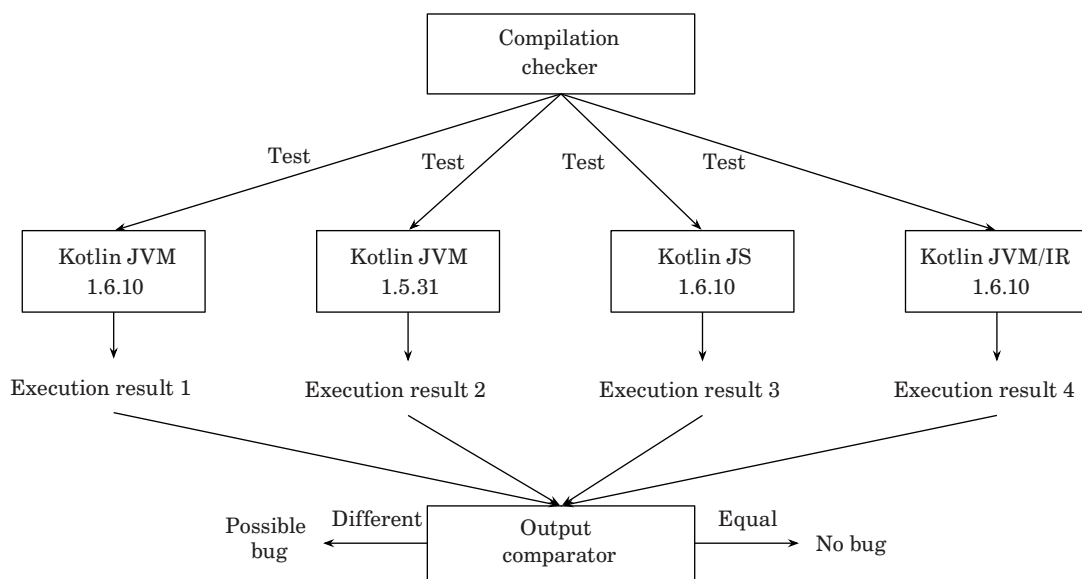
compiling Kotlin to JS and to native binaries, which can run without a virtual machine. At this moment our tool supports JVM and JS backends. Adding a native backend is considered future work. In addition to the release versions of the compiler, we are testing various dev-builds for pre-release testing of new functionality.

The first type of errors we look for are crashes, and it's quite easy to define them: their messages have a specific format that is easy enough to parse. Listing 2 shows an example of the crash message for the Kotlin compiler.

Listing 2. Example of Kotlin compiler crash message

```
Exception in thread "main" org.jetbrains.kotlin.codegen.CompilationException: Backend (JVM) Internal error: wrong bytecode generated
L0
    LINENUMBER 6 L0
    NOP
File being compiled: (1,1) in /File.kt The root cause
...
```

Detecting miscompilations is a task of a different complexity. To search for miscompilations, we need to compile the instrumented program with different backends or in different modes of the same backend and compare their behavior. This is done using the voting method, the scheme of which is shown in Fig. 6. And it is important to take into account the specifics of the backend, for example, in JS division by 0 is undefined, and in the JVM it is an exception. For such situations, we have implemented a set of filters that help save time on manual processing of such cases.



■ Fig. 6. Voting system for the Kotlin compiler

### Bug manager implementation

The bug manager is used to reduce the time for manual processing of found bugs. All algorithms and approaches described in the previous section are suitable for Kotlin compiler bugs post-processing. To improve the quality of reduction algorithms, more than thirty Kotlin specific transformations were implemented on two types of code representation: text and PSI. Examples of text transformations are: deleting text inside a balanced pair of brackets, deleting text between two dots, replacing *while* with *if*, etc. PSI based transformations, which are intended for complex modifications can be divided into the following groups:

- expression simplification (replace expression to constant of same type, simplification of *if* statements, loops, elvis operator, etc.);
- removal of unneeded components (imports, function arguments, etc.);
- simplification of interdependencies (removal of inherited properties and functions, replacement of function bodies with `TODO()`, etc.);
- miscellaneous (comment deletion, formatting, etc.).

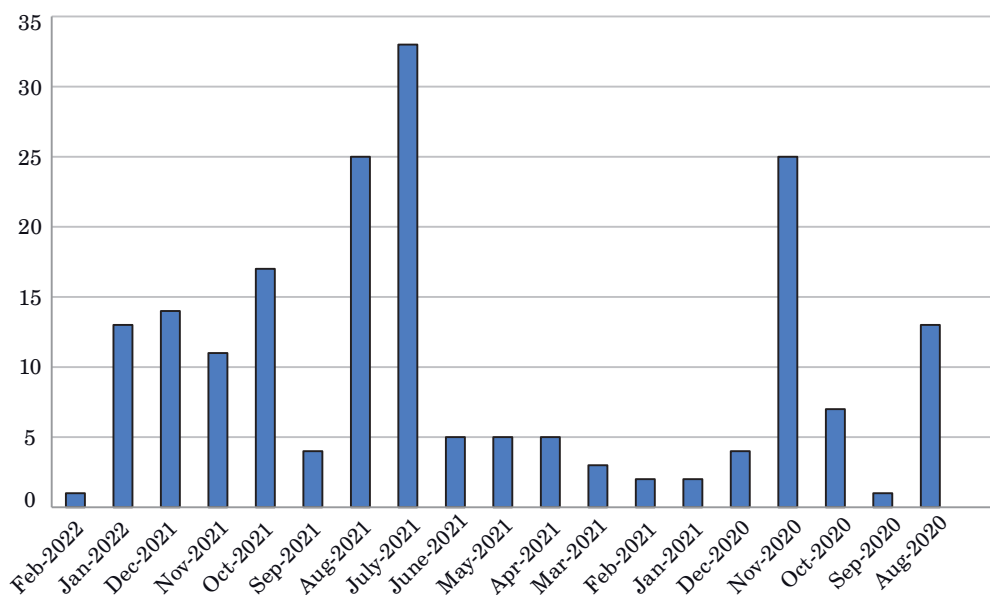
More details about the Kotlin program reducer and its results can be found in the article [20]. In general, a complex approach using language-agnostic methods and language-specific transformations gives a good result. In practice, more than 90% of irrelevant information is removed from programs that lead to errors.

### Kotlin compiler fuzzer evaluation

Active use of the tool has been going on for more than a 1.5 years. To estimate the effectiveness,

we have been collecting statistics and logs all this time. To fuzz the Kotlin compiler, we did not use any big computing power, because, despite the efficient work of post-processing algorithms, filtering uninteresting results and sending them to developers takes a lot of time. All interesting bugs were sent to Kotlin bug tracker – YouTrack (<https://youtrack.jetbrains.com/issues/KT?q=%23found-by-fuzzer%20>). Evaluation was mainly performed on a single computer with Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU@3.70 HGz and 32 GB RAM. The compiler version has always been kept up to date. As an initial seed for mutation, we selected a compiler test suite, consisting of more than 6000 files. Mostly fuzzing was done for the JVM backend, but for several months we were looking for bugs in the JS. It is also worth noting that BBF has been constantly improving during this time: new mutations and oracles have appeared, because without improvements at some point fuzzing stops working.

Figure 7 shows the number of bugs posted per month for all time of fuzzing. The first results began to be transferred to developers in August 2020. At that time, the compiler was not yet as reliable and stable as it is now. In November 2020, the Type Centric Enumeration approach [21] was implemented, which led to a significant increase in bugs found. After that, BBF interested the compiler development team and a lot of effort was spent to make the tool from research to practical. There were few launches during the rework, so there were few bugs before July 2021. In July 2021, the practice-oriented BBF went live and brought a lot of practical value. Developers often asked to test certain components of the compiler that were under development, which also influenced the general



■ Fig. 7. Number of bugs posted per month

■ Found bugs statistic

Bug status	Critical	Major	Normal	Minor	Not specified
Fixed	2	45	18	5	19
Open	0	11	12	2	16
In progress	0	1	2	0	1
Other	0	2	3	2	0

trend towards an increase in the number of bugs found.

Table shows statistics on the distribution of found bugs. A total of 208 bugs have been submitted as of this writing. Not specified bugs that do not fall into any category are either duplicates or not interesting from the developer's point of view. To better understand our impact, during the experiment, about 13% of the total number of bugs in the JVM backend was found using BBF. The total number of errors found is several thousand, but most of them are caused by semantically incorrect code. These bugs get a low priority and are unlikely to ever be fixed, so the decision was made not to send such bug reports to the developers.

References

1. Miller B. P., Koski D., Lee C. P., Maganty V., Murthy R., Natarajan A., & Steidl J. Fuzz revisited: A re-examination of the reliability of UNIX utilities and services. *Computer Sciences Department University of Wisconsin*, 1995. Available at: <https://minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/59964/TR1268.pdf> (accessed 16 August 2022).
2. Chen H., Pendleton M., Njilla L., & Xu S. A survey of compiler testing. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2020, vol. 53, no. 1, pp. 1–36. doi:10.1145/3363562
3. Purdom P. A sentence generator for testing parsers. *BIT Numerical Mathematics*, 1972, vol. 12, no. 3, pp. 366–375. doi:10.1007/BF01932308
4. Hanford K. V. Automatic generation of test cases. *IBM Syst. J.*, 1970, vol. 9, no. 4, pp. 242–257. doi:10.1147/sj.94.0242
5. Duncan A. G., Hutchison J. S. Using attributed grammars to test designs and implementations. *Proc. of the 5th Intern. Conf. on Software Engineering*, 1981, pp. 170–178.
6. A. van Wijngaarden. *Orthogonal Design and Description of a Formal Language*. Stichting Mathematisch Centrum, 1965.
7. Kreutzer P., Kraus S., Philippsen M. Language-agnostic generation of compilable test programs. *2020*

Conclusion

In this work, we have presented a platform for finding bugs in the programming language compilers – Backend Bug Finder. After reviewing the compiler fuzzing area and choosing the methods to be implemented, we considered all the ideas and principles implemented in the tool. On the basis of the developed platform, a fuzzer was implemented for the compiler of the Kotlin programming language. The results of fuzzing shows that the use of the fuzzer greatly improves the quality of the compiler: we published about 13% of the total number of bugs in the JVM backend reported during our experiment.

How difficult is it to adapt the platform to another programming language? It is pretty easy to make a naive fuzzer, which will probably find some errors. But for deep and complete testing of the compiler, efforts will have to be made to write language-specific transformations, reduction algorithms and infrastructure for the efficient execution of generated programs.

As for future work, the BBF will improve both in practical and theoretical terms. In practical side, we plan implement a paralleling of the fuzzing process. In theoretical side, we will move towards gray-box fuzzing and other methods of program generation for compiler testing purposes.

8. Yang X., Chen Y., Eide E., Regehr J. Finding and understanding bugs in C compilers. *Proc. of the 32nd ACM SIGPLAN Conf. on Programming Language Design and Implementation*, 2011, pp. 283–294. doi:10.1145/1993498.1993532
9. Bastani O., Sharma R., Aiken A., Liang P. Synthesizing program input grammars. *ACM SIGPLAN Notices*, 2017, pp. 95–110. doi:10.1145/3140587.3062349
10. Cummins C., Petoumenos P., Murray A., Leather H. Compiler fuzzing through deep learning. *Proc. of the 27th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Software Testing and Analysis*, 2018, pp. 95–105. doi:10.1145/3213846.3213848
11. Nagai E., Awazu H., Ishiura N., Takeda N. Random testing of C compilers targeting arithmetic optimization. *Workshop on Synthesis and System Integration of Mixed Information Technologies (SASIMI 2012)*, 2012, pp. 48–53. doi:10.1145/3428264
12. Le V., Afshari M., Su Z. Compiler validation via equivalence modulo inputs. *ACM Sigplan Notices*, 2014, pp. 216–226. doi:10.1145/2594291.2594334
13. Chen Y., Su T., Sun C., Su Z., Zhao J. Coverage-directed differential testing of JVM implementations. *Proc. of the 37th ACM SIGPLAN Conf. on Programming*



- Language Design and Implementation*, 2016, pp. 85–99. doi:10.1145/2908080.2908095
14. Holler C., Herzig K., and Zeller A. Fuzzing with code fragments. *Proc. of the 21st USENIX Conf. on Security Symp.*, 2012, pp. 445–458. doi:10.5555/2362793.2362831
  15. Misherghi G., Su Z. HDD: Hierarchical delta debugging. *Proc. of the 28th Intern. Conf. on Software Engineering*, 2006, pp. 142–151. doi:10.1145/1134285.1134307
  16. Weiser M. Program slicing. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1984, vol. SE-10, iss. 4, pp. 352–357. doi:10.1109/TSE.1984.5010248
  17. Myers E. W. AnO (ND) difference algorithm and its variations. *Algorithmica*, 1986, no. 1, pp. 251–266. doi:10.1007/BF01840446
  18. Wong W. E., Gao R., Li Y., Abreu R., Wotawa F. A survey on software fault localization. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2016, vol. 42, pp. 707–740. doi:10.1109/TSE.2016.2521368
  19. Chen J., Han J., Sun P., Zhang L., Hao D., Zhang L. Compiler bug isolation via effective witness test program generation. *Proc. of the 27th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conf. and Symp. on the Foundations of Software Engineering*, 2019, pp. 223–234. doi:10.1145/3338906.3338957
  20. Stepanov D., Akhin M., Belyaev M. ReduKtor: How we stopped worrying about bugs in kotlin compiler. *2019 34th IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering (ASE)*, 2019, pp. 317–326. doi:10.1109/ASE.2019.00038
  21. Stepanov D., Akhin M., Belyaev M. Type-centric Kotlin compiler fuzzing: Preserving test program correctness by preserving types. *14th IEEE Conf. on Software Testing, Verification and Validation (ICST)*, 2021, pp. 318–328.

УДК 004.05

doi:10.31799/1684-8853-2022-6-31-40

EDN: OOCYPQ

#### Backend Bug Finder – платформа для эффективного фаззинга компиляторов

Д. С. Степанов<sup>а</sup>, старший преподаватель, orcid.org/0000-0003-1719-0325

В. М. Ицыксон<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-0276-4517, vlad@icc.spbstu.ru

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 19, Санкт-Петербург, 195251, РФ

**Введение:** стандартным способом проверки надежности компилятора является ручное тестирование. Но с его помощью невозможно покрыть множество программ, которые могут быть написаны на целевом языке программирования. В настоящее время в дополнение к ручному тестированию существует множество автоматических методов проверки надежности компиляторов, среди которых фаззинг является одним из самых мощных и полезных. **Цель:** разработать платформу для фаззинга компиляторов и на ее основе инструмент для тестирования компилятора языка Kotlin. **Результаты:** разработана платформа Backend Bug Finder для фаззинга компиляторов. В качестве метода для генерации случайных программ выбран мутационный подход, когда на вход мутатору подается программа, которую он пытается каким-либо образом преобразовать. Мутации могут быть как тривиальными, например замена арифметических операторов другими, так и сложными, меняющими структуру программы. Далее полученная программа подается на вход компилятору, и производится проверка его работы. Разработанный тестовый оракул может детектировать ошибки трех типов: падения, мискомпиляции и деградации производительности. В случае обнаружения ошибки тестовый пример подается в модуль постобработки, где применяются алгоритмы редукции и дедупликации. На основе платформы для апробации подхода разработан инструмент для фаззинга компилятора языка Kotlin, который показал применимость платформы для поиска ошибок в современных компиляторах. **Практическая значимость:** за полтора года функционирования разработанный инструмент обнаружил тысячи различных ошибок компилятора языка Kotlin, из них более 200 отправлено разработчикам, более 80 исправлено.

**Ключевые слова** – фаззинг, тестирование компилятора, генерация компиляторных тестов, Kotlin, мутационный фаззинг.

**Для цитирования:** Stepanov D. S., Itsykson V. M. Backend Bug Finder – a platform for effective compiler fuzzing. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 6, с. 31–40. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-31-40, EDN: OOCYPQ

**For citation:** Stepanov D. S., Itsykson V. M. Backend Bug Finder – a platform for effective compiler fuzzing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 31–40. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-31-40, EDN: OOCYPQ



UDC 519.72

doi:10.31799/1684-8853-2022-6-41-52

EDN: UWXZHN

## Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events

A. A. Ovchinnikov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-8523-9429](https://orcid.org/0000-0002-8523-9429), [mldoc@guap.ru](mailto:mldoc@guap.ru)

A. M. Veresova<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, [orcid.org/0000-0002-3792-9249](https://orcid.org/0000-0002-3792-9249)

A. A. Fominykh<sup>a</sup>, Master, [orcid.org/0000-0002-1412-5766](https://orcid.org/0000-0002-1412-5766)

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** In modern systems for communication, data storage and processing the error-correction capability of codes are estimated for memoryless channels. In real channels the noise is correlated, which leads to grouping error in bursts. A traditional method to fight this phenomenon is channel decorrelation, which does not allow developing of coding schemes, mostly utilizing the channel capacity. Thus the development of bursts decoding algorithms for arbitrary linear codes is the actual task. **Purpose:** To develop a single error burst decoding algorithm for linear codes, to estimate the decoding error probability and computational complexity. **Results:** Two approaches are proposed to burst error correction. The first one is based on combining the window sliding modification of well-known bit-flipping algorithm with preliminary analysis of the structure of parity check matrix. The second one is based on the recursive procedure of constructing the sequence of certain events which, in the worst case, performs the exhaustive search of error bursts, but in many cases the search may be significantly decreased by using the proposed heuristics. The proposed recursive decoding algorithm allows a guaranteed correction of any single error bursts within burst-correction capability of the code, and in many cases beyond the burst-correction capability. The complexity of this algorithm is significantly lower than that of a bit flipping algorithm if the parity-check matrix of the code is sparse enough. An alternative hybrid decoding algorithm is proposed utilizing the bit-flipping approach and showing the error probability and completion time comparable to the recursive algorithm, however, in this case the possibility of a guaranteed burst correction hardly can be proved. **Practical relevance:** The proposed decoding methods may be used in modern and perspective communication systems, allowing energy saving and increasing reliability of data transmission by better error performance and computational complexity.

**Keywords** – channels with memory, low-density parity-check codes, burst error correction.

**For citation:** Ovchinnikov A. A., Veresova A. M., Fominykh A. A. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 41–52. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-41-52, EDN: UWXZHN

### Introduction

Error-correcting coding is very important mean to provide the reliable data communication [1–3]. For the last 20 years, significant attention was paid to investigating of low-density parity-check (LDPC) codes. Despite of moving during the last years the research focus to the area of polar codes [4–6], LDPC codes remain part of many contemporary standards, including digital video broadcasting (DVB), local wireless networks (802.11 WiFi), optical fiber communication (G.975.1), mobile networks of fifth generation (5G), etc.

For the last decades, traditionally the analysis of error-correcting performance of different codes in communication systems is hold by intensive modeling in the channel with additive white Gaussian noise [7]. This is mainly connected with the fact that modern code constructions such as turbo codes or LDPC codes are pseudo-random, and while providing low error probabilities, which is agreed with Shannon's random coding theorems, they are hardly suited for theoretical analysis.

Along with it, assumption of Gaussian nature of noise is justified, from the one hand, by simplic-

ity of this model, and from the other is provided by receiving decorrelation procedures, while in fact in many channels the noise process is not independent. To describe the typical errors in such channels, the notion of single error burst of length  $b$  in error vector of length  $n$  is used – this is any binary vector consisting of  $n$  elements, containing all its non-zero elements within  $b$  subsequent positions. Since the number of individual errors in such burst may exceed the error-correction capability of the code (for independent errors), they cannot be managed by classical algebraic decoders of cyclic codes. Due to pseudo-random nature, absence of strict structure and per-symbol decoding procedures of LDPC codes they are less sensitive to errors grouping, however, when using LDPC codes, artificial interleaving procedures are used to decorrelate the channel [8].

At the same time, it is known from information theory, that if an interleaving is applied to channel, and the property of noise correlation is not taken into account during decoding, we get an equivalent (in terms of average number of erroneous bits in channel) memoryless channel with less capacity [9]. Burst correction has low attention in classical coding theory, and is considered mainly for cyclic codes

[10–12]. In the recent publication [13] the burst erasure correction is considered, but only for the family of block-permutation LDPC codes and under consumption of fixed burst positions (phased burst). Thus the actual task is development of coding and decoding procedures for channels with memory, in particular, for single burst correction.

In [14] it was shown that the maximal burst length that can be corrected by LDPC code may be calculated using the polynomial-time procedure, taking the parity-check matrix as input. In fact the sparseness property of parity-check matrix does not taken into account in this procedure, so it may be applied to any linear code. However, the development of correspondent decoding algorithm realizing burst-correction capability of the code remain an open problem.

In this paper an approaches using sliding windows to single bursts correction is considered. These approaches are based on analysis of LDPC code parity-check matrix, however, obtained algorithms may be used for any linear codes, though with increasing the density of parity-check matrices the decoding complexity is also increasing.

### Low-density parity-check codes

Low-density parity-check codes were proposed by R. Gallager [15]. These codes usually have low minimal distance, however, good weight spectral properties and iterative decoding algorithms allow providing very low decoding error probabilities [16, 17]. LDPC codes are usually defined as elements of probabilistic ensembles, characterized by weight distributions of columns of parity-check matrix. From the analysis of the properties of LDPC ensembles it is known that irregular constructions (those with variable column weights) with well optimized weight distributions provide fast decreasing of error probability in the area of low signal-to-noise ratio [18]. However, these constructions are usually suffer from the effect of error-floor (low decreasing of error probability with signal-to-noise ratio increasing), and besides, encoding and decoding procedures for them may be not so effectively implemented as for regular constructions. That is why today in practice the block-permutation construction of LDPC codes is most widely used (including most communication standards), when the parity-check matrix has the form [19, 20]

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^{i_{11}} & \mathbf{C}^{i_{12}} & \dots & \mathbf{C}^{i_{1p}} \\ \mathbf{C}^{i_{21}} & \mathbf{C}^{i_{22}} & \dots & \mathbf{C}^{i_{2p}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{C}^{i_{\gamma 1}} & \mathbf{C}^{i_{\gamma 2}} & \dots & \mathbf{C}^{i_{\gamma p}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

where  $\mathbf{C}$  —  $(m \times m)$ -matrix of cyclic permutation:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Construction given in (1) defines regular quasi-cyclic code, for which especially computationally effective encoding and decoding algorithms may be implemented, and to obtain the advantages of optimized irregular distributions the masking may be used by replacing some cyclic permutation blocks in (1) by zero blocks.

It is known that the performance of LDPC decoders may be negatively affected by “bad” placements of non-zero elements in the parity-check matrix. As the simplest requirement to avoid this we will assume that there are no two rows or columns having more than one non-zero element in common positions (in this case one say that the matrix contains no cycles of length 4).

Calculation of the minimal distance of linear code, which defines the maximal number of correctable independent errors is NP-hard problem, at the same time, calculation of the maximal length of correctable single burst may be performed in polynomial time using the procedure described in [14]. This procedure is based on the fact that if the code can correct all single error bursts of length  $b_{\max}$  and less, then all error vectors, forming such bursts, should be in different cosets, or equivalently, have different syndrome. Thus, for any bursts  $\mathbf{e}_1$  and  $\mathbf{e}_2$  of length  $b_{\max}$  (or less) should holds  $\mathbf{e}_1 \mathbf{H}^T \neq \mathbf{e}_2 \mathbf{H}^T$ , besides, multiplication of error vector forming the burst of length  $b$  by the parity-check matrix is equivalent to linear combination of columns of  $\mathbf{H}$  in sub-matrix limited by  $b$  columns. That is, in matrix  $\mathbf{H}$  there should be no two submatrices of  $b_{\max}$  subsequent columns, whose linear combination has the same result. This is guaranteed in case when the rank of concatenation of these two submatrices by columns is  $2b_{\max}$ .

From the same considerations in the block-permutation matrix (1) the maximal length of correctable error burst is always less than the block size,  $b_{\max} < m$ , since sum of all columns within the block is all-ones column. However, in case when the parity-check matrix  $\mathbf{H}$  is masked by all-zero blocks, this may increase the length of correctable error burst. Experiments show that without masking, with high probability, especially when  $m$  is prime and  $\mathbf{H}$  has no cycles of length 4, the equation  $b_{\max} = m - 1$  holds.

The classical decoding method of LDPC codes in the channel with soft (continuous) output (e.g. additive white Gaussian noise channel) is belief propagation algorithm. However, in case of the channel

with binary output the simpler bit flipping algorithm may be used. In this paper, we consider only binary errors and we will consider only decoders with hard input and hard output.

The bit-flipping algorithm (Fig. 1) may be easily adapted to correction of single error burst by organizing the sliding window of size  $b_w$ , with the beginning running through possible starting positions of the burst from 0 to  $n - b_w$  (the decoding procedure may be significantly speeded up, if the estimations of supposed burst beginning are obtained, however, in the paper we are not considering such improvements). Clearly, one should select  $b_w \geq b_{\max}$ . In that algorithm the subvector of  $\mathbf{y}$  with elements on positions  $i, \dots, i + b_w - 1$  is denoted as  $\mathbf{y}(i, \dots, i + b_w - 1)$ , and for the matrix  $\mathbf{H}$  the submatrix formed by columns with numbers  $i, \dots, i + b_w - 1$ , is denoted as  $\mathbf{H}(i, \dots, i + b_w - 1)$ . By default, matrix multiplication is performed modulo 2, except when the operator “ $\otimes$ ” is used denoting operations in decimal arithmetic.

In case when the all-zero syndrome is obtained, the algorithm returns the decoded vector which is a codeword, and informs about successful decoding. If for all possible positions of the sliding window after all decoding iterations the all-zero syndrome is not obtained, decoder signaling about failure and returns the word received from the channel itself as the decoded word. It should be noted that of the burst length does not exceeds the maximal correctable length  $b_{\max}$ , then the state “success” always means correct decoding, otherwise “success” may be caused either by correct decoding or decoding error, that is, finding the wrong (false) codeword.

This algorithm may be modified for the “failure” state case by determining the decoding result according to some criterion, which would allow decreasing the number of bit errors. However, in this paper we will consider the error probability per transmitted word as the target decoding characteristics, so we will not consider such modifications.

For the channels with memory in [21] the modification of belief propagation algorithm is proposed, based on preliminary channel state esti-

mation and subsequent decoding. The advantage of this algorithm is the possibility of correcting multiple bursts and individual errors, disadvantage is growing complexity comparing to binary and integer operations, and necessity to provide the channel transition probabilities at the decoder’s input.

### Algorithms for single error burst decoding

We will develop the algorithm for error burst correction, starting with the structure of  $(r \times n)$  block-permutation matrix (1) of LDPC code (here  $r$  denotes the number of rows in  $\mathbf{H}$  rather than actual number of redundant bits). As it was mentioned, for this construction (without masking by all-zero blocks)  $b_{\max} < m$ , where  $m$  is block size. Let the error burst of length  $b \leq b_{\max}$  occurred in the channel, for simplicity we assume  $b = b_{\max}$ , and for the received word the syndrome  $\mathbf{S}$  is calculated. The subvector of error vector  $\mathbf{e}$  containing the non-zero elements (i.e. the subvector on burst positions) denote as  $\mathbf{e}_b$ . Assume that we have the exact knowledge about burst position and we may select the  $(r \times b)$ -submatrix  $\mathbf{H}_b$  containing columns of the parity-check matrix  $\mathbf{H}$  corresponding to burst positions. Compute the vector  $\mathbf{W} = \mathbf{1}_b \mathbf{H}_b^T$ , where  $\mathbf{1}_b$  is all-one vector of length  $b$ , i.e.  $\mathbf{W}$  is the sum of all columns of  $\mathbf{H}_b$ . Consider two cases: the burst is either completely within some block of  $\mathbf{H}$ , or, taking into account  $b < m$ , disturbing no more than two adjacent blocks of  $\mathbf{H}$ .

The first case is shown in Fig. 2,  $\alpha$ , for the parity-check matrix with block size  $m = 7$  and maximal correctable burst length  $b_{\max} = 6$ . Since every block of  $\mathbf{H}$  is cyclic permutation matrix and contains exactly one non-zero element in the row, the vector  $\mathbf{W}$  may contain only zeros and ones. If some  $i$ -th syndrome’s component is not zero, the correspondent  $i$ -th component of  $\mathbf{W}$  should also be non-zero (otherwise successful decoding for current submatrix  $\mathbf{H}_b$  is not possible, since it contains no columns which would give non-zero syndrome element in  $i$ -th row). Hence, there are the only column in  $\mathbf{H}_b$  which con-

INPUT:  $(r \times n)$ -matrix  $\mathbf{H}$ , received word  $\mathbf{y}$ , window size  $b_w$ , maximal number of iterations  $N$ .

OUTPUT: decoded word  $\hat{\mathbf{a}}$  and status “success” or “failure” of the decoder.

1. Calculate  $\mathbf{S} = \mathbf{y}\mathbf{H}^T$ ; if  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$ , return  $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{y}$  and “success”.

2. For  $i = 0$  to  $n - b_w$  // cycle for sliding window positions:

2.1. For current window position set  $\mathbf{S}_b = \mathbf{S}$ ,  $\mathbf{y}_b = \mathbf{y}(i, \dots, i + b_w - 1)$ ,  $\mathbf{H}_b = \mathbf{H}(i, \dots, i + b_w - 1)$ .

2.2. For  $j = 1$  to  $N$  // cycle for decoding iterations:

2.2.1. Calculate  $\mathbf{f}_b = \mathbf{S}_b \otimes \mathbf{H}_b$  (in decimal arithmetics).

2.2.2. Determine the set  $pos = \arg \max \{f_b\}$  of positions numbers of  $\mathbf{f}$  with maximal values.

2.2.3. Invert elements of  $\mathbf{y}_b$  in  $pos$  positions.

2.2.4. Renew  $\mathbf{S}_b = \mathbf{y}_b \mathbf{H}_b^T$ , if  $\mathbf{S}_b = \mathbf{0}$ , add (modulo 2) to subvector  $\mathbf{y}(i, \dots, i + b_w - 1)$  the vector  $\mathbf{y}_b$ , return  $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{y}$  and “success”.

3. Return  $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{y}$  and “failure”.

■ Fig. 1. Windowed bit-flipping algorithm



tributes to non-zero syndrome element. The number of this column corresponds to erroneous position within burst, we may subtract this column from the syndrome and continue decoding. As can be seen from the Fig. 2, *a*, for given example consideration of first three non-zero elements of the syndrome leads to all-zero syndrome and reconstructs the error burst  $\mathbf{e}_b$ . Consider also the vector  $\mathbf{f}_b = \mathbf{S}_b \otimes \mathbf{H}_b$ , which we use in windowed bit-flipping algorithm (see Fig. 1) – for considered example all its maximal components correspond to erroneous burst positions, and the others are zero (windowed bit-flipping algorithm would correct such a burst by one iteration).

Now we consider more complicated case when the burst affected two adjacent blocks of  $\mathbf{H}$  (Fig. 2, *b*). In this case the rows of  $\mathbf{H}_b$  may be all-zeros, contain one non-zero element, or two elements from different blocks (in this example the border between blocks are between second and third columns of  $\mathbf{H}_b$ ). In figure the burst  $\mathbf{e}_b$  and vector  $\mathbf{f}_b$  are also shown. In this case the comparison by their elements does not allow, as in Fig. 2, *a* to determine error bits in  $\mathbf{e}_b$  by the values of  $\mathbf{f}_b$  with such confidence – for example, the value 2 which is close to maximal may correspond both to first position without error and to last with error.

Basing on considered examples we may determine the following conditions by considering elements  $\mathbf{W}$  and  $\mathbf{S}$ , from which certain decoding states or events is followed, and formulate the corresponding decoding steps:

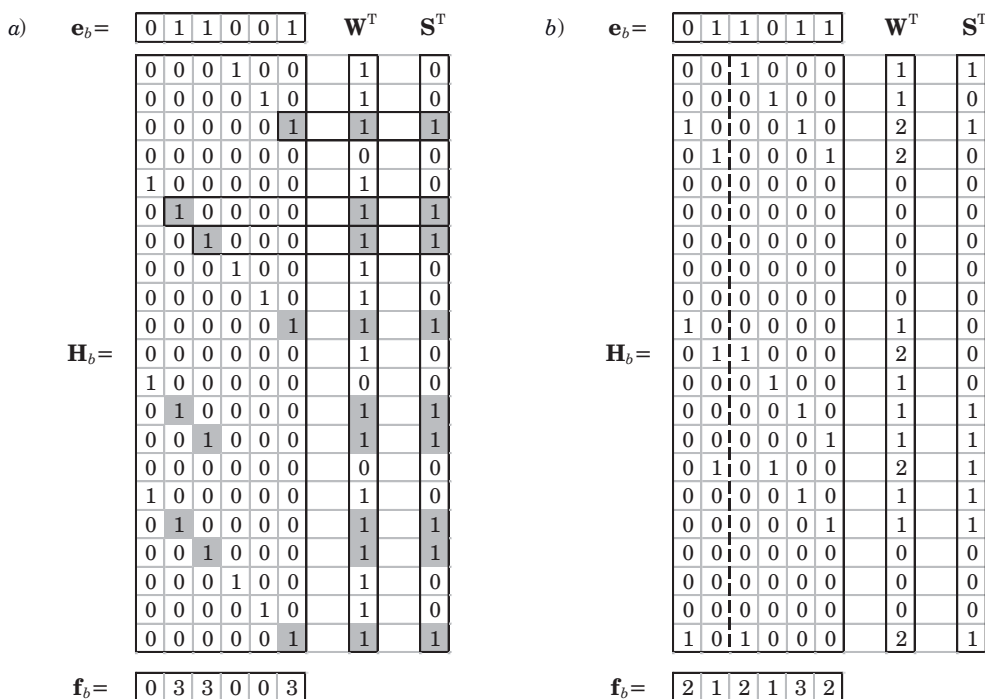
– ( $\mathbf{W}_i = 0, \mathbf{S}_i = 1$ ): in this case the syndrome  $\mathbf{S}$  cannot be obtained by any combination of bit errors within current burst position (i.e. current position of sliding window), decoding should be stopped and new window position should be defined (event “impossible”);

– ( $\mathbf{W}_i = 1, \mathbf{S}_i = 1$ ): in this case the column correspondent to erroneous position within burst may be uniquely determined, correspondent bit of  $\mathbf{e}_b$  on this position is set to 1, and the column is marked as considered (for given window position this bit within the burst would never change its value), then  $\mathbf{W}$  and  $\mathbf{S}$  may be renewed and decoding continues within current window (event “certain 1”);

– ( $\mathbf{W}_i = 1, \mathbf{S}_i = 0$ ): in this case the column with one non-zero element in *i*-th row is certainly did not take part in computation of  $\mathbf{S}$ , the correspondent bit of  $\mathbf{e}_b$  on position correspondent to this column may be set to 0, the column is marked as considered, which leads to renewal of  $\mathbf{W}$ , and decoding continues within current window (event “certain 0”);

– ( $\mathbf{W}_i > 1, \mathbf{S}_i = 1$ ): for the considered block-permutation constructions and  $b < m$  this event is possible only for  $\mathbf{W}_i = 2$ , but in general case one may assume larger number of ones in *i*-th row of  $\mathbf{H}_b$ , in this case we cannot certainly determine the values of any positions of the burst from *i*-th components of  $\mathbf{W}$  and  $\mathbf{S}$  (event “ambiguity”).

We may note that all listed situations are based on considering the non-zero elements of syndrome, except special case “certain 0”. First three cases determine certain events (with conditional probability



■ Fig. 2. Decoding by certain events: *a* – burst within the block; *b* – burst in two blocks

equal to 1, for the given window position): impossibility of decoding, certain zero and one values within the burst, conditioning that the burst is within the positions of current window. Basing on these events, the procedure may be determined looking through elements of  $\mathbf{S}$  and  $\mathbf{W}$  and performing described decoding steps, while the event “impossible” would be determined or the all-zero syndrome obtained. However, during the decoding the situation is possible, when for all non-zero syndrome elements the event “ambiguity” is determined. An example of such situation is given in Fig. 3, *a* for the case when two erroneous positions within the burst is found, and correspondent columns are excluded from consideration (in figure they are shadowed). Using the rule for the event “certain 0” in Fig. 3, *a* will lead to very fast successful decoding, but this event may be absent (Fig. 3, *b*). Note that the parity-check matrix in Fig. 3, *b* is not block-permutation, and the burst of length 9 is considered, while the code from this example may correct all bursts of length no more than 7.

In the case described in Fig. 3, *b*, the resolving of ambiguity is possible by using some heuristics [22], for example. As one variant we consider the hybrid decoder, when in case of ambiguity the decoding is switched to conventional bit-flipping within current window, until successful decoding or reaching the maximal number of iterations. Such approach defines in fact two-stage decoding which may be considered as windowed bit-flipping decoding with preliminary processing based on certain events.

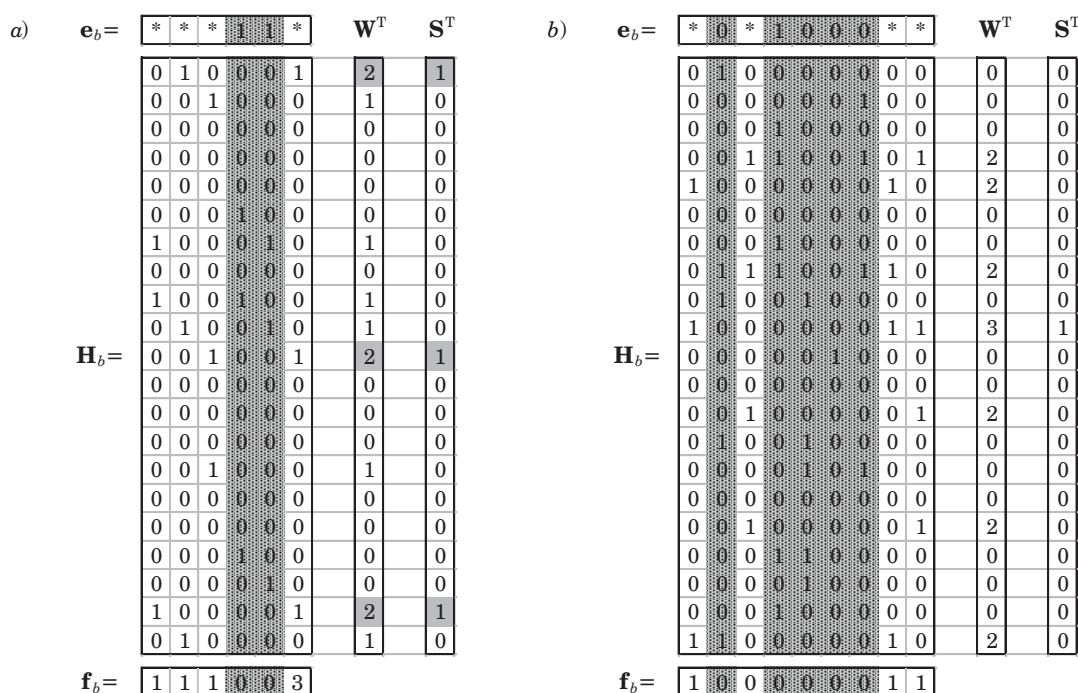
However, to ensure guaranteed decoding of burst (at least within the burst-correction capability of the code) another approach may be considered. In case of uncertainty we make trial selection of erroneous position and return to certain events consideration basing on new  $\mathbf{W}$  and  $\mathbf{S}$ , until success or impossibility of the decoding will be determined, in the latter case the algorithm should trace back and select another trial erroneous bits. If in the process of one trial we again meet the ambiguity, the next trial is made and so on, thus leading to tree-like exhaustive search. Surely, such search would lead to significant grow of complexity. To reduce the search, we will select as trial erroneous positions those with maximal value in vector  $\mathbf{f}_b = \mathbf{S}_b \otimes \mathbf{H}_b$ .

Basing on these considerations, the following recursive algorithm may be proposed as general method of single burst decoding:

1) for the current window position determine certain values of error burst positions basing on conditions on  $\mathbf{S}$  and  $\mathbf{W}$ , until decoding ends or event “ambiguity” is determined (for all non-zero elements of  $\mathbf{S}$ );

2) for the “ambiguity” decoding state select the position with maximal value of current vector  $\mathbf{f}_b$  as the next erroneous position and return to step 1, in case of failure select the next maximal value of  $\mathbf{f}_b$  and so on; if trial succeeded or all (non-zero) elements of  $\mathbf{f}_b$  are considered, go to step 3;

3) if the burst  $\mathbf{e}_b$  giving the all-zero syndrome is obtained during preceding steps, return codeword  $\hat{\mathbf{a}}$ , which is vector  $\mathbf{y}$  added (modulo 2) by burst  $\mathbf{e}_b$  on



■ Fig. 3. Uncertainty during decoding: *a* – resolvable by event “certain 0”; *b* – without resolving by certain events

window positions, otherwise decoding in current window is failed.

Described algorithm should be performed for all possible positions of sliding window, its pseudocode is given in Figures 4 and 5.

In fact, in the worst case for the given window position the algorithm performs exhaustive search by vectors  $\mathbf{e}_b$ , which guarantees finding the error burst giving the all-zero syndrome, however, extremely time-consuming. However, if described algorithm is applied to LDPC codes, especially for block-permutation constructions, and if the burst length does not exceeds burst correction capability of the code, in many cases decoding is ended by the first step (processing of certain events), either successfully or not, then all the positions of error burst may be determined by no more than  $b$  steps.

To fasten the decoding speed (by cost of failure probability increasing, naturally), the recursion depth or the number of considered elements in  $\mathbf{f}_b$  may be limited.

### Analysis of decoding algorithms and simulation results

The algorithms described in preceding sections were implemented in MatLab environment under MS Windows 10, the simulations were made using CPU Intel Core i7-9700@3,00 GHz, RAM 32 Gb. The following algorithms were considered:

- windowed bit-flipping algorithm (WBF);
- hybrid decoding with processing of certain events basin on  $\mathbf{W}$  and  $\mathbf{S}$  with switching to windowed bit-flipping algorithm in case of ambiguity (WS + WBF);
- recursive algorithm.

The following code constructions were selected for analysis:

- code 1: random (66.35) block-permutation LDPC code (1) with parameters  $\gamma = 3, \rho = 6, m = 11$  (density of the parity-check matrix is  $\chi \approx 0.09$ ), for this code  $b_{\max} = 10$ ;

INPUT:  $(r \times n)$ -matrix  $\mathbf{H}$ , received word  $\mathbf{y}$ , window size  $b_w$ .  
 OUTPUT: decoded word  $\hat{\mathbf{a}}$ , status “success” or “failure” of the decoding.  
 1. Calculate  $\mathbf{S} = \mathbf{yH}^T$ ; if  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$ , return  $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{y}$  and “success”.  
 2. For  $i = 0$  до  $n - b_w$  // cycle for sliding window positions:  
 2.1. Set  $\mathbf{H}_b = \mathbf{H}(i, \dots, i + b_w - 1)$ ,  $\mathbf{e}_b = (0, \dots, 0)$ .  
 2.2. Calculate  $\mathbf{W} = \mathbf{I}_b \mathbf{H}_b^T$ .  
 2.3. Call procedure  $[\mathbf{e}_b, \text{status}] = \text{try\_decode}(\mathbf{H}_b, \mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{e}_b)$ , given in Fig. 5.  
 2.4. If status = “success”, add (modulo 2) to subvector  $\mathbf{y}(i, \dots, i + b_w - 1)$  the vector  $\mathbf{e}_b$ , return  $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{y}$  and “success”.  
 3. Return  $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{y}$  and “failure”.

■ Fig. 4. General scheme of single error burst decoding algorithm

PROCEDURE:  $[\mathbf{e}_b, \text{status}] = \text{try\_decode}(\mathbf{H}_b, \mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{e}_b)$ .  
 INPUT:  $(r \times b_w)$ -matrix  $\mathbf{H}_b$ , syndrome  $\mathbf{S}$ , vector  $\mathbf{W}$ , current burst  $\mathbf{e}_b$ .  
 OUPUT: renewed  $\mathbf{e}_b$ , status “success” or “failure”.  
 1. If  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$ , return  $[\mathbf{e}_b, \text{“success”}]$ .  
 2. If  $\exists i: \mathbf{W}_i = 0$  and  $\mathbf{S}_i = 1$  (“impossible” event is determined), return  $[\mathbf{e}_b, \text{“failure”}]$ .  
 3. For the first  $i = 0, \dots, r$ , for which  $\mathbf{W}_i = 1$  and  $\mathbf{S}_i = 0$  (“certain 0” event is determined) or  $\mathbf{S}_i = 1$  (“certain 1” event is determined):  
 3.1. Find  $j$ : the number of (the only) nonzero element in  $i$ -th row of  $\mathbf{H}_b$ .  
 3.2. Set  $\mathbf{e}_b(j) = \mathbf{S}_i$ .  
 3.3. If  $\mathbf{S}_i = 1$ , then renew the syndrome: sum (modulo 2)  $\mathbf{S}$  and the column  $j$  of matrix  $\mathbf{H}_b$ .  
 3.4. Mark the column  $j$  of  $\mathbf{H}_b$  as considered (technically it may be zeroed).  
 3.5. Renew the vector  $\mathbf{W}$ .  
 3.6. Call  $[\mathbf{e}_b, \text{status}] = \text{try\_decode}(\mathbf{H}_b, \mathbf{S}, \mathbf{W}, \mathbf{e}_b)$ .  
 3.7. If status = “success”, return  $[\mathbf{e}_b, \text{status}]$ .  
 3.8. If status = “failure”, set  $\mathbf{e}_b(j) = 0$  and return  $[\mathbf{e}_b, \text{status}]$ .  
 4. Calculate  $\mathbf{f}_b = \mathbf{S} \otimes \mathbf{H}_b$  (in decimal numbers). Sort  $\mathbf{f}_b$  together with the number of its positions by decrease, obtaining the vector  $\mathbf{f}_{b, \text{sort}}$  and corresponding array of indexes  $\text{ind}$ . Determine  $f_{>0}$  – the number of non-zero elements in  $\mathbf{f}_b$ .  
 5. For  $i = 1, \dots, f_{>0}$ :  
 5.1. Set  $j = \text{ind}(i)$  ( $j$  – position of the next element in  $\mathbf{f}_b$  by the value).  
 5.2. Set  $\mathbf{e}_b(j) = 1$ .  
 5.3. Calculate trial renewal of syndrome  $\mathbf{S}'$  by adding the  $j$ -th column of  $\mathbf{H}_b$  to  $\mathbf{S}$ .  
 5.4. Set the trial renewal of  $\mathbf{H}'_b$ , marking  $j$ -th column as considered.  
 5.5. Calculate trial renewal of  $\mathbf{W}'$ .  
 5.6. Call  $[\mathbf{e}_b, \text{status}] = \text{try\_decode}(\mathbf{H}'_b, \mathbf{S}', \mathbf{W}', \mathbf{e}_b)$ .  
 5.7. If status = “success”, return  $[\mathbf{e}_b, \text{“success”}]$ .  
 5.8. If status = “failure”, restore the value  $\mathbf{e}_b(j) = 0$  (if trial versions  $\mathbf{H}'_b, \mathbf{S}', \mathbf{W}'$  where not in separate memory, their values also should be restored by the moment of entrance in the cycle).  
 6. If this step is reached, then the search through elements of  $\mathbf{f}_b$  is completed without success, return  $[\mathbf{e}_b, \text{“failure”}]$ .

■ Fig. 5. Recursive procedure of decoding trial

- code 2: random (66.33) code with density  $\chi \approx 0.1$  and  $b_{\max} = 12$ ;
- code 3: random (66.33) code with density  $\chi \approx 0.5$  and  $b_{\max} = 13$ .

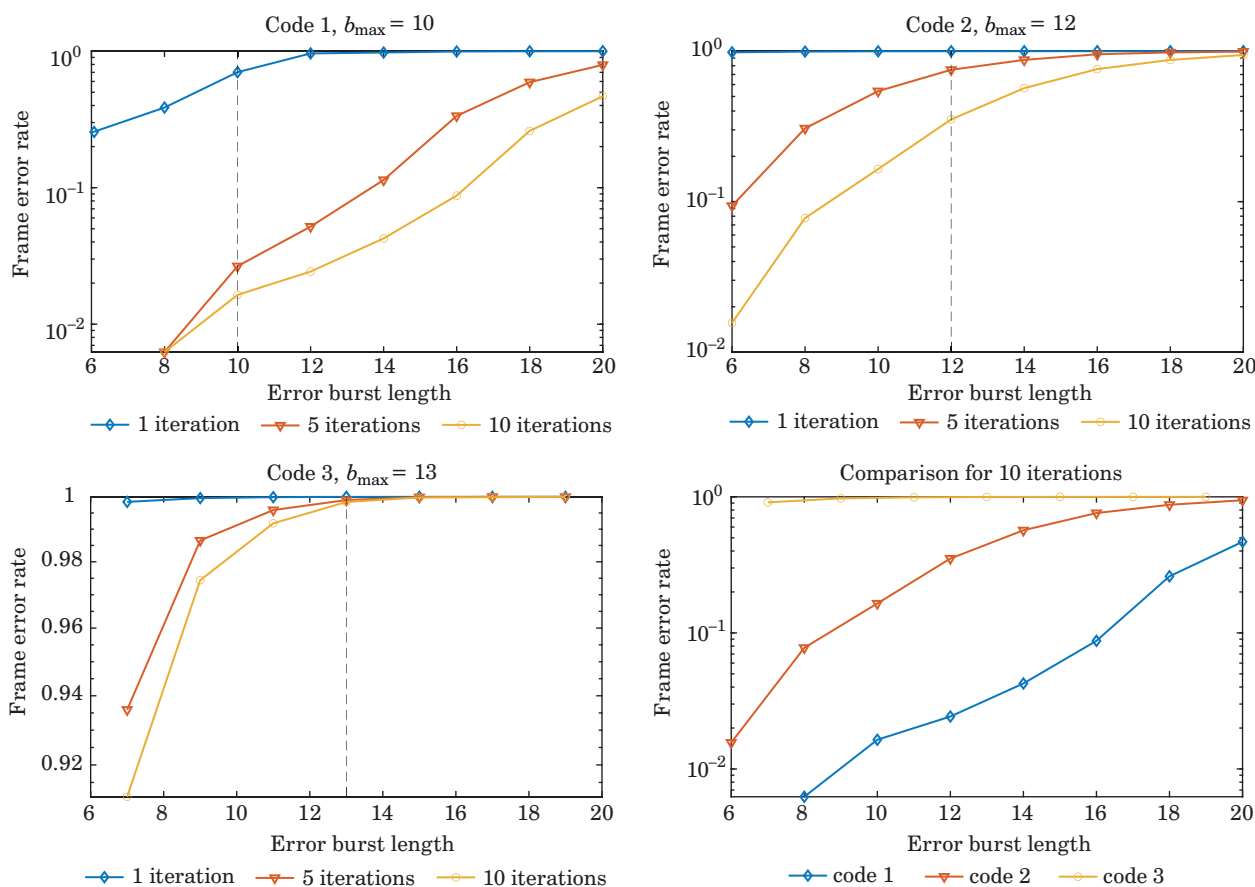
Relatively small lengths of the codes were selected to fasten simulations in MatLab, since for the code 3 (which is defined by the dense parity-check matrix) simulations take significant time. At the same time, some experiments with longer codes gave qualitatively the same results, so in what follows we consider the codes with listed parameters.

For error vector generation the burst beginning was selected randomly and uniformly, the first and last positions of the burst are set to ones, erroneous bits within the burst were generated with probability 0.5, decoding fastening by means of estimation the burst position was not applied. Note that the simulation was also made for burst lengths exceeding the correction capabilities of the codes, so the decoding error event consists both of decoding failure and decoding error, that is finding false codeword.

In Fig. 6 the results of evaluating the codeword (frame) error rate is given for windowed bit-flipping algorithm with 1, 5, 10 iterations, for the single burst lengths from 6 to 20. As can be seen from the curves, windowed bit-flipping algorithm did not re-

alize the burst-correction capability in any case, and since the algorithm is based on the sparsity of the parity-check matrix, for dense matrix (code 3) the error probability rapidly tends to one. For the matrix (code 2) with density close to those of block-permutation construction (code 1) the error probability is remarkably higher comparing to code 1. This may be connected to the fact that random matrix of code 2 was not optimized in its structure for using traditional iterative decoders for LDPC codes. During decoding, all error events were caused by decoding failures, no any false codewords were found.

In Fig. 7 the results for recursive decoding is given. The average time of one codeword decoding (in seconds) were also estimated. Since no special optimizations of decoders implementations were not performed, the goal of time estimation is to approximately evaluate the comparative complexity in different cases. For code 1 and code 2 the decoding algorithm was fully completed. During simulations of code 1 and code 2 there were no any cases of ambiguity shown in Fig. 3. Besides, decoding did not lead to any failure events, so all decoding errors were caused by false codewords, and in many cases the decoding for burst lengths exceeding the correction capability was successful. As can be seen from



■ Fig. 6. Simulation results for windowed bit-flipping algorithm

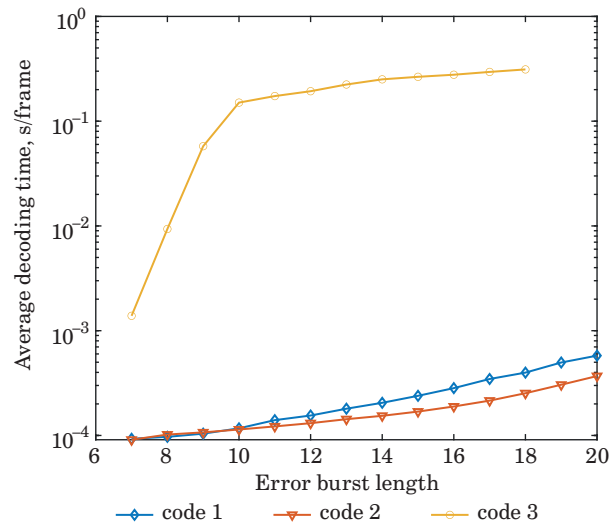
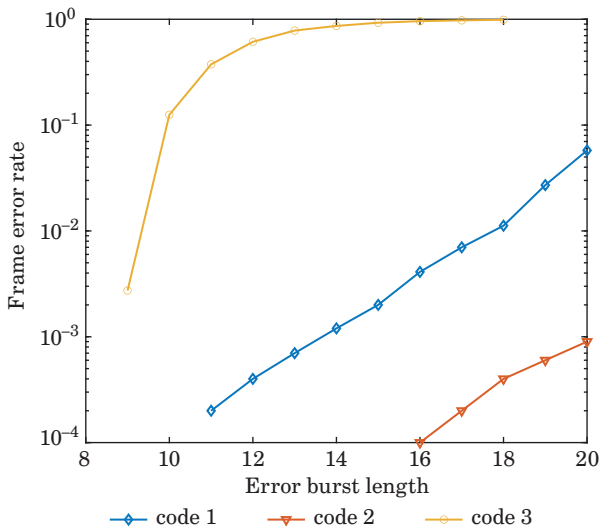


Fig. 7, code 2 provides better error probability comparing to code 1, with comparable but slightly less decoding complexity.

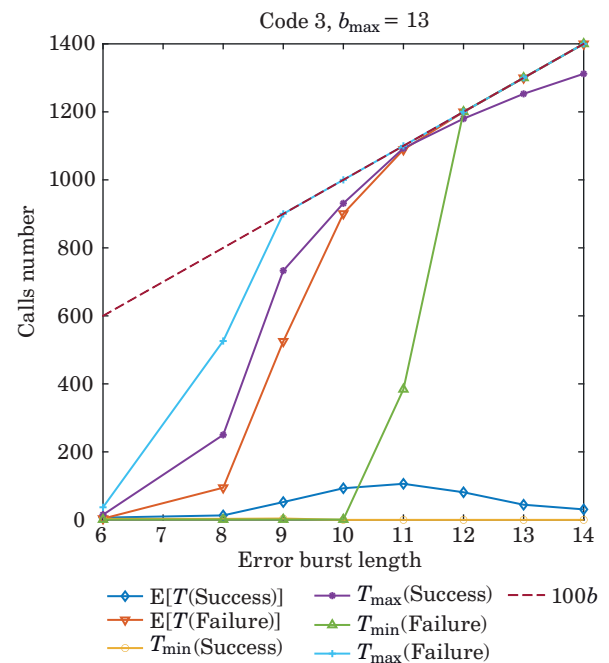
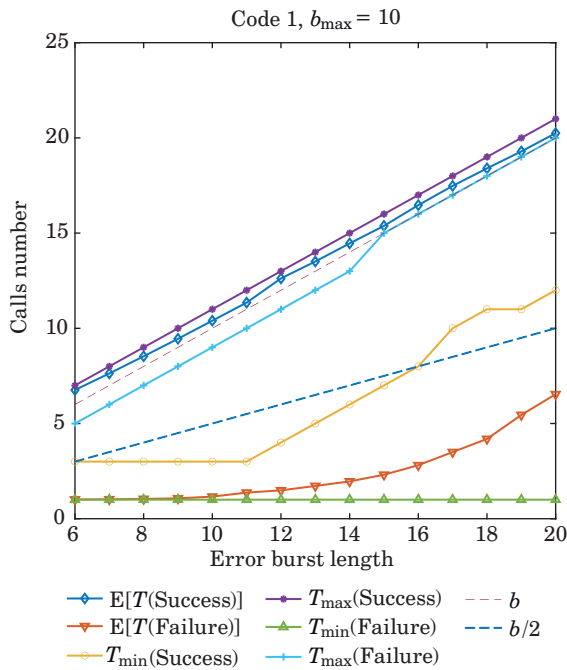
As for code 3, which is defined by dense matrix, the simulation shows fundamentally different results. The decoding of one codeword might be up to 1000 times slower than for code 1 and code 2, in fact in this case the decoder with high probability tends to brute force of error bursts. Thus for the code 3 in Fig. 7 the artificial limitation of the number of calls of `try_decode` procedure was set, equal to  $100b_w$ . In this case decoder stops to find the false

codewords and started to fail. From the window size of about 10, where the time curve of code 3 decoding changes its fast growth by gentle increasing (see Fig. 7), the decoding failure in almost all cases is connected to reaching the maximal recursion depth for all window positions, and not with determining “impossible” event. Even in case of successful decoding, the recursion depth was close to maximal.

In Fig. 8 for the code 1 and code 3 are given:  $T_{\min}(\text{Success})$ ,  $T_{\max}(\text{Success})$ ,  $E(T(\text{Success}))$  – minimal, maximal and average number of calls of `try_decode` procedure (see Fig. 5) for successful



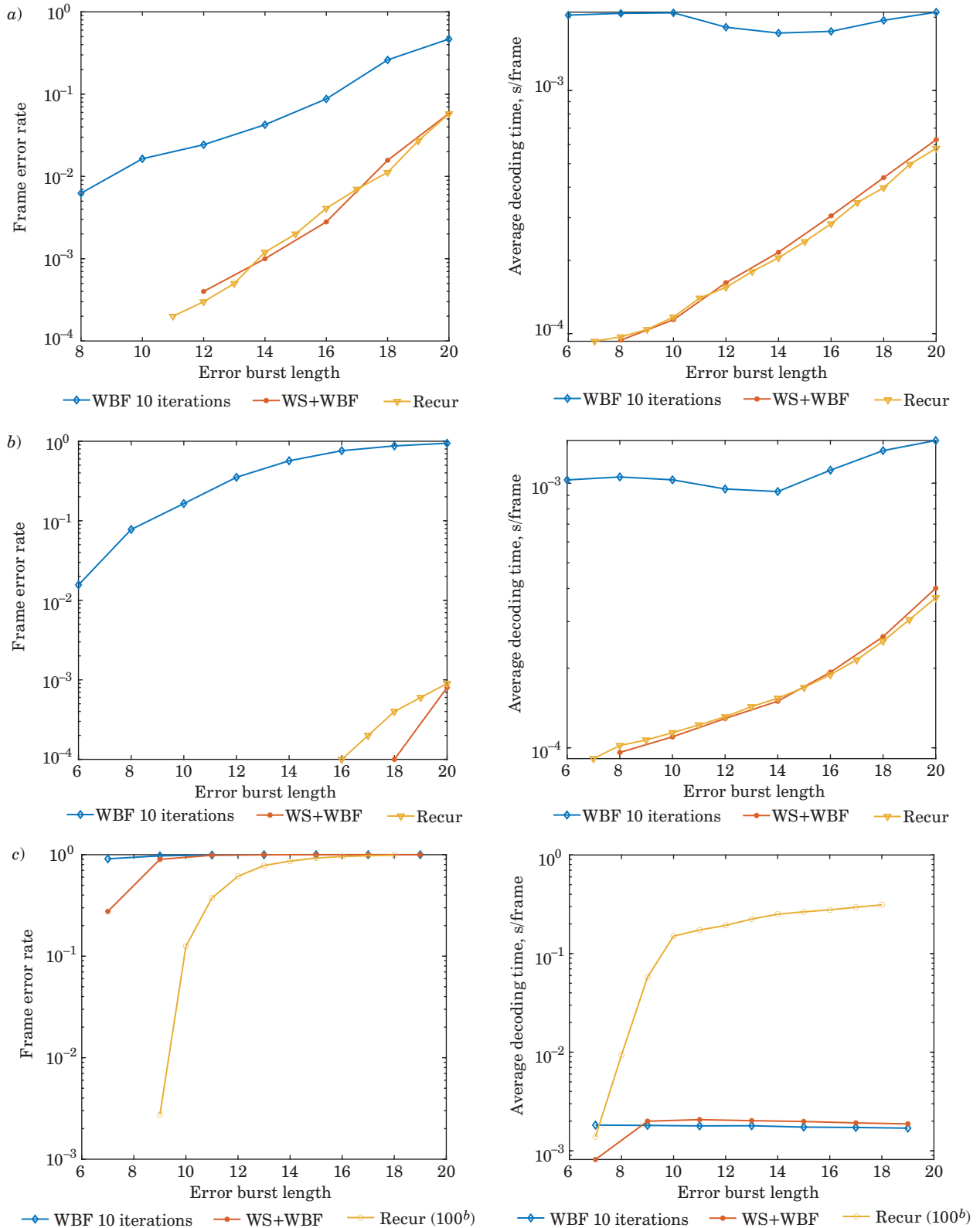
■ Fig. 7. Simulation results for recursive algorithm of single burst correction



■ Fig. 8. The number of calls of `try_decode` procedure

decoding in the window,  $T_{\min}(\text{Failure})$ ,  $T_{\max}(\text{Failure})$ ,  $E(T(\text{Failure}))$  – similar values for failed decoding in the window. As one can see, for the code 1 the maxi-

mal number of calls of `try_decode` for given window position is approximately equal to window size  $b_w$  both for correct and not correct window position.



■ Fig. 9. Comparison of different decoders for code 1 (a), code 2 (b) and code 3 (c)

Minimal number of calls may be approximated as  $b_w/2$  for correct window position and 1 otherwise (in this case the event “impossible” is determined by the first call). For the code 3 the maximal recursion depth (and average for failed decoding) rapidly increasing and approaches upper limit of 100 window sizes even for burst lengths below correction capability.

In Fig. 9, *a* the evaluation of error probability and decoding time for windowed bit-flipping, hybrid and recursive algorithms for code 1 are presented. As can be seen, algorithms using analysis of certain events show approximately the same error probability (an order less than for bit-flipping algorithm) and comparable decoding time, the error events (caused only by false codewords) appears only for burst lengths exceeding the capability of the code. Recall that for these algorithms no uncertainty during decoding were reached, so the decoding completed only by determination of certain events.

In Fig. 9, *b, c* the similar results for code 2 and code 3 are given. For code 2 the gain obtained by decoders analyzing the certain events comparing to bit-flipping algorithm is even larger than for code 1, this may be reasoned both by worse performance of bit-flipping algorithm for code 2, and by the fact that code 2 has slightly larger burst-correction capability than code 1, and perhaps – better weight spectrum for correcting single bursts, so the decoding far beyond correction capability for this code is possible. For the code 3 given by dense matrix, the recursive algorithm (with recursion depth limited by 100 window sizes) shows significant gain for bursts length up to 10 (recall that code 3 has  $b_{\max} = 13$ ), and two other decoders tends to error probability equal to 1. This gain is achieved by cost of significant decoding time, in all cases, when error probability close to 1, decoding time stops to change

with burst length increasing, since in practically all cases decoding for all window positions is failed.

## Conclusion

In this paper the decoding of single error bursts with linear codes is considered. The analysis of windowed decoding is hold, basing on determination of certain events using structure of the parity-check matrix. The two-stage hybrid decoder is considered, combining the consideration of certain events with bit-flipping algorithm. The recursive decoding algorithm is proposed, which guarantees correction of single error bursts with correction capability, the search in this decoder is optimized by selecting the least reliable position, determined by the column with most coincides of non-zero elements with syndrome. The evaluation of error probability and average decoding time per transmitted codeword is performed by computer simulation. The simulation results show that proposed algorithms allow to correct large number of single error bursts with lengths exceeding the burst-correction capability. Proposed recursive algorithm may be applied to any linear code, however taking into account, that the decoding complexity is reasonable (and significantly less than for bit-flipping algorithm) only for codes which parity-check matrix is sparse enough.

## Financial support

The paper was prepared with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00305 “Spatial-temporal stochastic models of wireless networks with a large number of users”.

## References

1. Moon T. K. *Error correction coding: Mathematical methods and algorithms*. Wiley, 2020. 992 p.
2. Lin Z. *Design of network coding schemes in wireless networks*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2022. 166 p.
3. Gazi O. *Forward error correction via channel coding*. Cham, Springer, 2020. 319 p.
4. Ghaddar N., Kim Y.-H., Milstein L. B., Ma L., and Yi B. K. Joint channel estimation and coding over channels with memory using polar codes. *IEEE Transactions on Communications*, Oct. 2021, vol. 69, no. 10, pp. 6575–6589. doi:10.1109/TCOMM.2021.3098822
5. Sasoglu E., Tal I. Polar coding for processes with memory. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, vol. 65, no. 4, pp. 1994–2003. doi:10.1109/TIT.2018.2885797
6. Shao S., Hailes P., Wang T.-Y., Wu J.-Y., Maunder R. G., Al-Hashimi B. M., Hanzo L. Survey of Turbo, LDPC, and polar decoder ASIC implementations. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 2309–2333. doi:10.1109/COMST.2019.2893851
7. Stevens A. *Monte-Carlo simulation: an introduction for engineers and scientists*. First ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2022. 112 p.
8. Jihwan S., Lee H.-K. Burst error correction for convolutional code concatenated with Hamming code with a block interleaver. *2020 Intern. Conf. on Artificial Intelligence in Information and Communication (IC-AIIC)*, Fukuoka, Japan, 2020, pp. 531–533. doi:10.1109/ICAIC48513.2020.9065198
9. Loyka S., Charalambous C. D. On the capacity of Gaussian MIMO channels with memory. *IEEE Communications Letters*, 2022, vol. 26, no. 8, pp. 1760–1763. doi:10.1109/LCOMM.2022.3174774
10. Veresova A. M., Ovchinnikov A. A. Comparison of the probability of Reed – Solomon and LDPC codes decoding error in the Gilbert – Elliott channel. *2022*

- Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, 2022, pp. 1–4. doi:10.1109/WECONF55058.2022.9803501
11. Kulhandjian M., Kulhandjian H., D'Amours C. Improved soft decoding of Reed – Solomon codes on Gilbert – Elliott channels. *2019 IEEE Intern. Symp. on Information Theory (ISIT)*, Paris, France, 2019, pp. 1072–1076. doi:10.1109/ISIT.2019.8849456
  12. Song L., Huang Q., Wang Z. Construction of multiple-burst-correction codes in transform domain and its relation to LDPC codes. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, vol. 68, no. 1, pp. 40–54. doi:10.1109/TCOMM.2019.2948341
  13. Xiao X., Vasić B., Lin S., Li J., and Abdel-Ghaffar K. Quasi-cyclic LDPC codes with parity-check matrices of column weight two or more for correcting phased bursts of erasures. *IEEE Transactions on Communications*, May 2021, vol. 69, no. 5, pp. 2812–2823. doi:10.1109/TCOMM.2021.3059001
  14. Veresova A. M., Ovchinnikov A. A. About one algorithm for correcting bursts using block-permutation LDPC-codes. *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, 2019, pp. 1–4. doi:10.1109/WECONF.2019.8840580
  15. Gallager R. G. *Low density parity check codes*. Cambridge, MA, MIT Press, 1963. 90 p.
  16. Zhu K., Wu Z., Comprehensive study on CC-LDPC, BC-LDPC and Polar code. *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2020, pp. 1–6. doi:10.1109/WCNCW48565.2020.9124897
  17. Jeong S., Ha J. MET-LDPC code ensembles of low code rates with exponentially few small weight codewords. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, vol. 69, no. 6, pp. 3517–3527. doi:10.1109/TCOMM.2021.3063348
  18. Ovchinnikov A. A., Fominykh A. A. About some irregular degree distributions of LDPC codes in two-state channels. *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, 2021, pp. 1–4. doi:10.1109/WECONF51603.2021.9470627
  19. Xiao X., Vasic B., Lin S., Abdel-Ghaffar K., Ryan W. E. Reed – Solomon based quasi-cyclic LDPC codes: designs, girth, cycle structure, and reduction of short cycles. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, vol. 67, no. 8, pp. 5275–5286. doi:10.1109/TCOMM.2019.2916605
  20. Li J., Gong Y., Lin S., Abdel-Ghaffar K. Balanced incomplete block designs, partial geometries, and their associated QC-LDPC codes. *2021 11th Intern. Symp. on Topics in Coding (ISTC)*, Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1–5. doi:10.1109/ISTC49272.2021.9594122
  21. Eckford A. W., Kschischang F. R., Pasupathy S. Analysis of low-density parity-check codes for the Gilbert – Elliott channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, vol. 51, no. 11, pp. 3872–3889. doi:10.1109/TIT.2005.856934
  22. Ovchinnikov A., Fominykh A. About burst decoding for block-permutation LDPC codes. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 20-th Intern. Conf., NEW2AN 2020, and 13-th Conf., ruSMART 2020*, Saint-Petersburg, Russia, 2020, pp. 393–401. doi:10.1007/978-3-030-65726-0\_35

УДК 519.72

doi:10.31799/1684-8853-2022-6-41-52

EDN: UWXZHN

### Декодирование линейных кодов при исправлении одиночных пакетов ошибок на основе определения достоверных событий

А. А. Овчинников<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-8523-9429, mldoc@guar.ru

А. М. Вересова<sup>а</sup>, аспирант, orcid.org/0000-0002-3792-9249

А. А. Фоминых<sup>а</sup>, магистр, orcid.org/0000-0002-1412-5766

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** в современных системах связи, хранения и обработки данных помехоустойчивость различных кодов, исправляющих ошибки, оценивается для каналов без памяти. В реальных каналах связи шум представляет собой коррелированный случайный процесс, что приводит к группированию ошибочных бит в пакеты. Классический подход для борьбы с пакетированием ошибок состоит в применении процедуры декорреляции канала, что не позволяет строить кодовые схемы, наиболее полно реализующие пропускную способность канала. Таким образом, актуальной является задача построения алгоритмов декодирования для исправления пакетов ошибок для произвольных линейных кодов. **Цель:** разработать алгоритм декодирования одиночных пакетов ошибок для линейных кодов, оценить вероятность ошибки и вычислительную сложность разработанного алгоритма. **Результаты:** предложены два подхода к исправлению пакетов ошибок. Первый основан на комбинировании оконной модификации известного алгоритма инвертирования бит с предварительным анализом структуры проверочной матрицы. Второй основан на рекурсивной процедуре построения последовательности достоверных событий, в наихудшем случае осуществляющей полный перебор пакетов ошибок, который во многих случаях может быть значительно сокращен с помощью предложенной эвристики. Предложенный рекурсивный алгоритм декодирования позволяет гарантированно исправлять любые одиночные пакеты ошибок в пределах корректирующей способности кода, а с высокой вероятностью и сверх корректирующей способности. Сложность этого алгоритма значительно ниже сложности алгоритма



инвертирования бит, если проверочная матрица линейного кода является достаточно разреженной. Альтернативный гибридный алгоритм декодирования с использованием инвертирования бит для низкоплотностных кодов показывает вероятность ошибки и время выполнения, сравнимые с рекурсивным алгоритмом, однако возможность гарантированного исправления пакетов ошибок с его помощью вряд ли может быть доказана. **Практическая значимость:** предложенные методы декодирования могут быть использованы в современных и перспективных системах связи, позволяя экономить энергию и повышать надежность передачи данных за счет лучшей эффективности исправления ошибок и меньшей вычислительной сложности.

**Ключевые слова** — каналы с памятью, коды с малой плотностью проверок на четность, исправление пакетов ошибок.

**Для цитирования:** Ovchinnikov A. A., Veresova A. M., Fominykh A. A. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 6, с. 41–52. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-41-52, EDN: UWXZHN

**For citation:** Ovchinnikov A. A., Veresova A. M., Fominykh A. A. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 41–52. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-41-52, EDN: UWXZHN



УДК 519.21: 537.86  
ББК 22.17

**Хименко В. И.**  
**Выбросы случайных процессов и проблема пересечений уровней**  
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2022. – 582 с. ISBN 978-5-94836-658-6

Характеристики выбросов, пересечения заданных уровней, экстремальные значения случайных процессов – это класс характеристик, позволяющих описать структуру и вероятностное поведение случайных функций. По своему содержанию такие характеристики относятся к направлению междисциплинарных исследований. Необходимость их изучения связана с решением многочисленных задач из различных областей физики, техники и естествознания.

Содержание данной работы отражает современное состояние исследований в области прикладной теории выбросов и общей проблемы «пересечений уровней». Здесь делается попытка систематизации, обобщения и развития основных результатов, попытка рассмотрения проблематики превышений заданных уровней «в целом» для наиболее распространенных классов случайных функций. Представлено большое количество новых результатов. Это относится к анализу вероятностной структуры временных рядов, непрерывных случайных процессов, случайных потоков событий и случайных пространственно-временных полей. Показаны возможности общей классификации прикладных задач и особенности их решения на основе использования характеристик пересечений уровней.

Для широкого круга специалистов, аспирантов и студентов, для тех, кто изучает, исследует и применяет на практике модели и методы анализа различных по своей физической природе случайных данных.



## Оценка времен задержки по временным рядам кольцевых автоколебательных систем с запаздыванием

**В. И. Пономаренко**<sup>а,б</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-1579-6465](https://orcid.org/0000-0002-1579-6465), [ponomarenkovj@gmail.com](mailto:ponomarenkovj@gmail.com)

**Е. Е. Лапшева**<sup>б</sup>, старший преподаватель, [orcid.org/0000-0001-6632-1083](https://orcid.org/0000-0001-6632-1083)

**М. Д. Прохоров**<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор РАН, [orcid.org/0000-0003-4069-9410](https://orcid.org/0000-0003-4069-9410)

<sup>а</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Зеленая ул., 38, Саратов, 410019, РФ

<sup>б</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Астраханская ул., 83, Саратов, 410012, РФ

**Введение:** задача оценки времени задержки в кольцевых автоколебательных системах с запаздыванием по временным рядам возникает в самых различных областях науки и имеет большое значение при исследовании реальных систем, генерирующих хаотические временные ряды. **Цель:** провести сравнительный анализ работы методов реконструкции систем с запаздыванием по хаотическим временным рядам в отсутствие и при наличии аддитивного шума. **Методы:** применялись методы оценки времени запаздывания по статистике экстремумов, с использованием автокорреляционной функции и метод порядковой временной асимметрии. На основе последнего метода предложен метод, ориентированный на оценку времен запаздывания в системах с двумя задержками. **Результаты:** проведен сравнительный анализ работы четырех методов реконструкции времен запаздывания в автоколебательных системах с запаздыванием по хаотическим временным рядам на примере систем Икеды с одним и двумя временами запаздывания. Показано, что в отсутствие аддитивного шума метод оценки времени запаздывания, основанный на статистике экстремумов, является наиболее точным для случая анализа временных рядов систем как с одним, так и с двумя запаздываниями. При наличии аддитивного шума предложенный в рамках работы модифицированный метод порядковой временной асимметрии при анализе систем с одним временем запаздывания работает не хуже, чем метод автокорреляционной функции и порядковой временной асимметрии. В случае двух времен запаздывания модифицированный метод порядковой временной асимметрии работает лучше других. **Практическая значимость:** описанные методы могут иметь практическое приложение при оценке времени запаздывания в автоколебательных системах, при этом уровень аддитивного шума может влиять на точность оценки.

**Ключевые слова** — системы с запаздыванием, автоколебательные системы, оценка параметров, реконструкция уравнений, хаотические временные ряды.

**Для цитирования:** Пономаренко В. И., Лапшева Е. Е., Прохоров М. Д. Оценка времен задержки по временным рядам кольцевых автоколебательных систем с запаздыванием. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 6, с. 53–61. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-53-61, EDN: SOYXID

**For citation:** Ponomarenko V. I., Lapsheva E. E., Prokhorov M. D. Estimation of delay times from time series of ring self-oscillatory time-delay systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 53–61 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-6-53-61, EDN: SOYXID

### Введение

Системы, поведение которых определяется не только текущими значениями динамической переменной, но и одним или более задержанными состояниями, широко распространены в природе и технике. Задержка в распространении сигнала в различных реальных системах может быть часто связана с конечностью скорости распространения потока информации, определяющей характеристики системы. Запаздывание играет ключевую роль в формировании хаотического сигнала в радиофизических генераторах с запаздыванием [1], оптических системах [2–4], а также проявляется в целом ряде биологических и физиологических систем [5–8]. В динамике популяций запаздывание связано с тем, что особи

участвуют в репродукции лишь после периода взросления [9]. Одним из практических применений кольцевых автоколебательных систем с задержкой является построение систем передачи информации на хаотической несущей [10], в том числе в оптическом диапазоне [11, 12].

Оценка запаздывания по временным рядам колебаний является важной задачей для многих научных дисциплин и может помочь в понимании принципа функционирования исследуемых систем, а также для целей моделирования и прогнозирования поведения. Для решения задачи оценки параметров систем с запаздыванием используют специально разработанные методы, которые постоянно совершенствуются. При оценке параметров используют теоретико-информационные подходы [13, 14], регрессионный анализ

[15, 16], анализ экстремумов временных рядов [17], метод множественной стрельбы [18], метод ближайших соседей [19], энтропию перестановок [20], взвешенную энтропию перестановок [21], методы машинного обучения [22] и др. Внимание исследователей привлекают новые методы, применимые для оценки времени запаздывания по экспериментальному временному ряду, и способы расширения их функциональности.

Задача оценки времени запаздывания существенно осложняется, когда динамика системы зависит не от одного, а от двух и более задержанных координат. Так, в работе [23] был предложен новый метод оценки одного запаздывания по временному ряду, который может быть развит для эффективной оценки параметров в системах с двумя запаздываниями. В настоящей работе проведены сравнительный анализ трех методов оценки времен запаздывания в автоколебательной системе с одним запаздыванием, модификация метода для оценки двух времен запаздывания [23] и сравнение нового метода с методами, основанными на анализе экстремумов и автокорреляционной функции.

### Методы оценки времени запаздывания

Системы с запаздыванием, описываемые дифференциальным уравнением первого порядка, могут быть записаны в достаточно общем виде как

$$\varepsilon \dot{x} = f(x, x(t - \tau_1), x(t - \tau_2), \dots, x(t - \tau_s)), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — параметр инерционности системы;  $f$  — некоторая нелинейная функция;  $x$  — динамическая переменная;  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_s$  — времена запаздывания;  $s$  — число времен запаздывания в системе.

В работе рассмотрены три часто используемых метода для оценки времени запаздывания по временным рядам и предложена модификация одного из методов, ориентированная на оценку двух времен запаздывания.

Первый метод основан на анализе статистики экстремумов [17]. Принцип его работы базируется на том, что расстояние между экстремумами временного ряда кольцевой системы с запаздыванием не может принимать значения, равные времени запаздывания. Таким образом, если построить зависимость количества временных интервалов между экстремумами от длительности этих временных интервалов, то количество временных интервалов длительности, равной времени запаздывания в системе, будет минимальным.

Метод статистики экстремумов был применен к временным рядам автоколебательных систем

с двумя запаздываниями в цепи обратной связи. Показано [24], что в зависимости от числа пар экстремумов временной реализации, удаленных друг от друга на некоторое пробное время запаздывания, присутствует два минимума, соответствующих двум временам запаздывания.

Для оценки времени задержки в системах с запаздыванием часто применяется автокорреляционная функция, например, при оценке времени запаздывания по временным рядам интенсивности лазеров, описываемых уравнением с запаздыванием [25]. Автокорреляционная функция определяет зависимость взаимосвязи между сигналом и его сдвинутой копией от величины временного сдвига. По временному ряду колебаний  $x(t)$  исследуемой системы автокорреляционная функция может быть определена как

$$R(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T - \tau} x(t)x(t + \tau)dt, \quad (2)$$

где  $x(t)$  — исследуемый временной ряд;  $\tau$  — временной сдвиг;  $t$  — текущее время;  $T$  — время наблюдения. Автокорреляционная функция имеет экстремумы на временных сдвигах, близких к времени задержки и кратным ему временам. Метод оценки времени задержки, основанный на расчете автокорреляционной функции, является вторым из рассматриваемых в данной работе методов.

В работе [23] предложен метод порядковой временной асимметрии для оценки единственной задержки по временному ряду. Этот метод был применен для нелинейного фильтра скользящего среднего с задержкой, хаотического отображения с задержкой и реальных климатических рядов.

Вкратце суть метода заключается в следующем. Порядковое символическое представление получается из исходного временного ряда путем построения векторов из трех значений переменных с лагом  $\tau$  (в дискретном времени  $n$ ) ( $x(i), x(i - n), x(i - 2n)$ ). При этом значение динамической переменной заменено на числа от 1 до 3 в зависимости от его величины. Самое маленькое значение соответствует 1, среднее 2, самое большее 3. Таким образом, из временного ряда длиной  $N$  выборок можно построить  $N - 2$  векторов (шаблонов), каждый из которых представляет собой перестановку вектора (1, 2, 3). Количество возможных вариантов равно шести ( $\pi_1 = (1, 2, 3)$ ,  $\pi_2 = (1, 3, 2)$ ,  $\pi_3 = (2, 1, 3)$ ,  $\pi_4 = (2, 3, 1)$ ,  $\pi_5 = (3, 1, 2)$ ,  $\pi_6 = (3, 2, 1)$ ). Затем оценивается вероятность каждого шаблона. Для гауссова случайного процесса вероятность шаблона не зависит от лага  $\tau$ . В то же время, как показано в [23], для уравнения скользящего среднего с задержкой эти веро-

ятности демонстрируют отклонение от среднего значения при величине лага, соответствующей истинному времени задержки  $\tau_1$ .

Для оценки времени запаздывания предложено [23] также использовать порядковую временную асимметрию (Ordinal Temporal Asymmetry, ОТА):

$$ОТА = |\pi_1 - \pi_6| + |\pi_2 - \pi_4| + |\pi_3 - \pi_5|. \quad (3)$$

Эта мера достигает максимума при  $\tau = \tau_1$ , что было показано в работе [23] на примере нелинейного фильтра, хаотических дискретных отображений и реальных примерах.

В настоящей работе описанный метод применяется для кольцевой системы с запаздыванием, а также на его базе предложен новый метод для исследования временных рядов систем с одним и двумя временами запаздывания.

Предлагаемый нами модифицированный метод порядковой временной асимметрии заключается в том, что для построения шаблонов используется не один лаг, как это было сделано в [23], а два, т. е. рассматриваются векторы  $[x(i), x(i - n), x(i - n - m)]$ . Другими словами, анализируются три точки временного ряда, но не с равными расстояниями между ними, как в методе порядковой временной асимметрии, а с разными: между первой и второй точками расстояние равно  $n$ , а между второй и третьей —  $m$ . Затем проводится суммирование вероятностей появления шаблонов и нахождение ОТА для каждой пары  $m, n$  в соответствии с (3). Таким образом, пробным временам запаздывания соответствуют две координаты,  $m$  и  $n$ , и каждой паре значений  $m, n$  соответствует своя величина ОТА. Величина ОТА отображается цветовой гаммой на плоскости пробных лагов  $(m, n)$ .

## Результаты оценки времени запаздывания по временному ряду

### Сравнение методов оценки времени задержки для системы с одним запаздыванием

В данном разделе проведено сравнение работы всех четырех перечисленных выше мер оценки времени запаздывания по временному ряду для типичного представителя системы первого порядка с одним запаздыванием — уравнения Икеды [2] вида

$$\varepsilon \dot{x} = -x + \alpha \sin(x(t - \tau_1)), \quad (4)$$

где время запаздывания  $\tau_1 = 100$ ; параметр инерционности  $\varepsilon = 4$ ; параметр нелинейности  $\alpha = 4$ . Расчеты проводились методом Эйлера с шагом 1 и длиной временного ряда  $10^5$  точек.

Примеры применения выбранных мер к временному ряду системы (4) представлены на рис. 1, *a–e*. На рис. 1, *e* светлые области соответствуют более высоким значениям ОТА, темные — более низким. Время запаздывания хорошо оценивается по вертикальной линии, соответствующей максимальным значениям ОТА. Также для иллюстрации построена картина локальных максимумов, подобно тому, как строятся скелетоны в вейвлет-спектрах. Черная вертикальная линия соответствует времени запаздывания системы (4). Видно, что один из максимумов хорошо соответствует времени запаздывания.

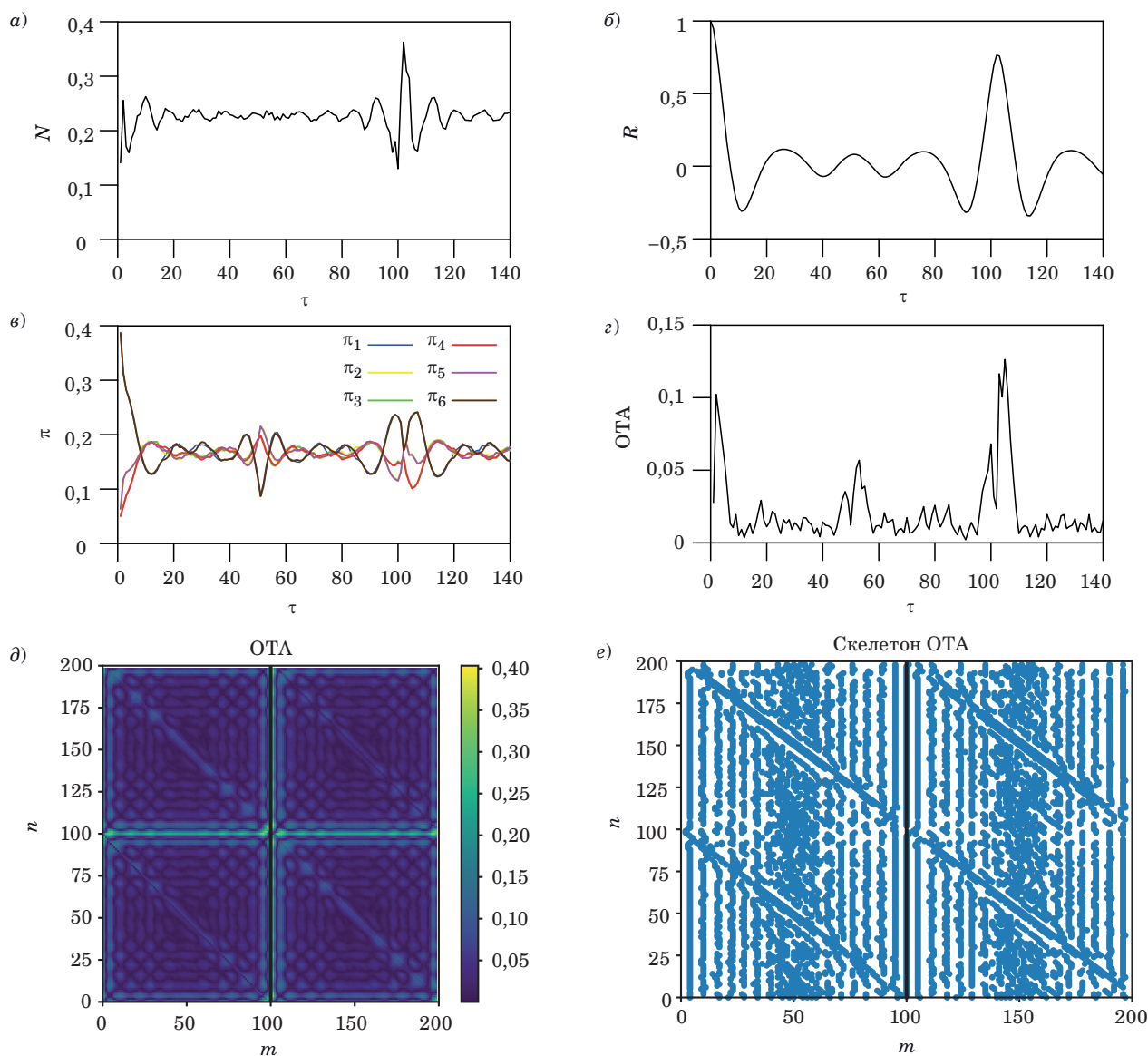
Как и ожидалось, метод статистики экстремумов является наиболее точным. Минимум  $N(\tau)$  строго соответствует времени запаздывания  $\tau_1 = 100$ . Автокорреляционная функция демонстрирует особенности вблизи времени запаздывания, максимум  $R(\tau)$  соответствует значению 102 и смещен на две единицы дискретного времени относительно истинного времени запаздывания. Экстремумы в вероятности порядковых паттернов на рис. 1, *b* смещены относительно истинного значения. Так, паттерн  $\pi_6$  демонстрирует максимумы на временах 99 и 103. Кроме того, есть также экстремумы на времени, близком к половинному времени запаздывания. Это существенно затрудняет оценку времени запаздывания по временному ряду. В суммарном значении порядковой временной асимметрии ОТА (рис. 1, *d*) есть максимумы, мешающие оценке времени запаздывания в системе. На плоскости рис. 1, *d* и *e* время запаздывания определяется более уверенно и составляет 101, что отличается от истинного на 1 %.

При добавлении аддитивного шума минимум  $N(\tau)$  при истинном времени запаздывания на рис. 1, *a* становится менее выраженным. При уровне добавленного шума 2 % от дисперсии сигнала системы (4) минимум перестает соответствовать точному времени запаздывания, демонстрируя смещение в большую или меньшую сторону. При этом автокорреляционная функция, метод ОТА и модифицированный метод ОТА не демонстрируют изменения оценки запаздывания по сравнению с сигналом без шума. При дальнейшем увеличении уровня шума появляется возможность оценить время запаздывания с погрешностью лишь по максимуму  $N(\tau)$ , в то время как минимум становится неразличимым. Другие методы еще продолжают работать.

### Сравнение методов оценки времени задержки для системы с двумя запаздываниями

Интересно исследовать возможность реконструкции времен задержки в кольцевых автоколебательных системах с двумя запаздываниями, поскольку в реальных сетевых системах со сложными связями часто присутствуют процес-





■ **Рис. 1.** Примеры применения выбранных мер к временному ряду системы (4): *a* – статистика экстремумов; *b* – автокорреляционная функция; *c* – вероятности порядковых паттернов с  $D = 3$ ; *d* – модифицированная порядковая временная асимметрия ОТА; *e* – скелетон модифицированной порядковой временной асимметрии

■ **Fig. 1.** Examples of applying the selected measures to the time series of the system (4): *a* – statistics of extrema; *b* – autocorrelation function; *c* – ordinal patterns probabilities with  $D = 3$ ; *d* – modified ordinal temporal asymmetry ОТА; *e* – modified ordinal temporal asymmetry skeleton

сы, динамика которых определяется не одной, а большим количеством задержек.

В этой статье проанализирована работа четырех мер для временного ряда модифицированной системы Икеды с двумя временами запаздывания:

$$\dot{x} = -x + 0,5(\alpha \sin(x(t - \tau_1))) + 0,5(\alpha \sin(x(t - \tau_2))), \quad (5)$$

где  $\tau_1 = 80$ ,  $\tau_2 = 100$ ,  $\varepsilon = 5$ ,  $\alpha = 4$ . Расчеты проводились по временному ряду длиной  $10^5$  точек, шаг интегрирования составлял 1.

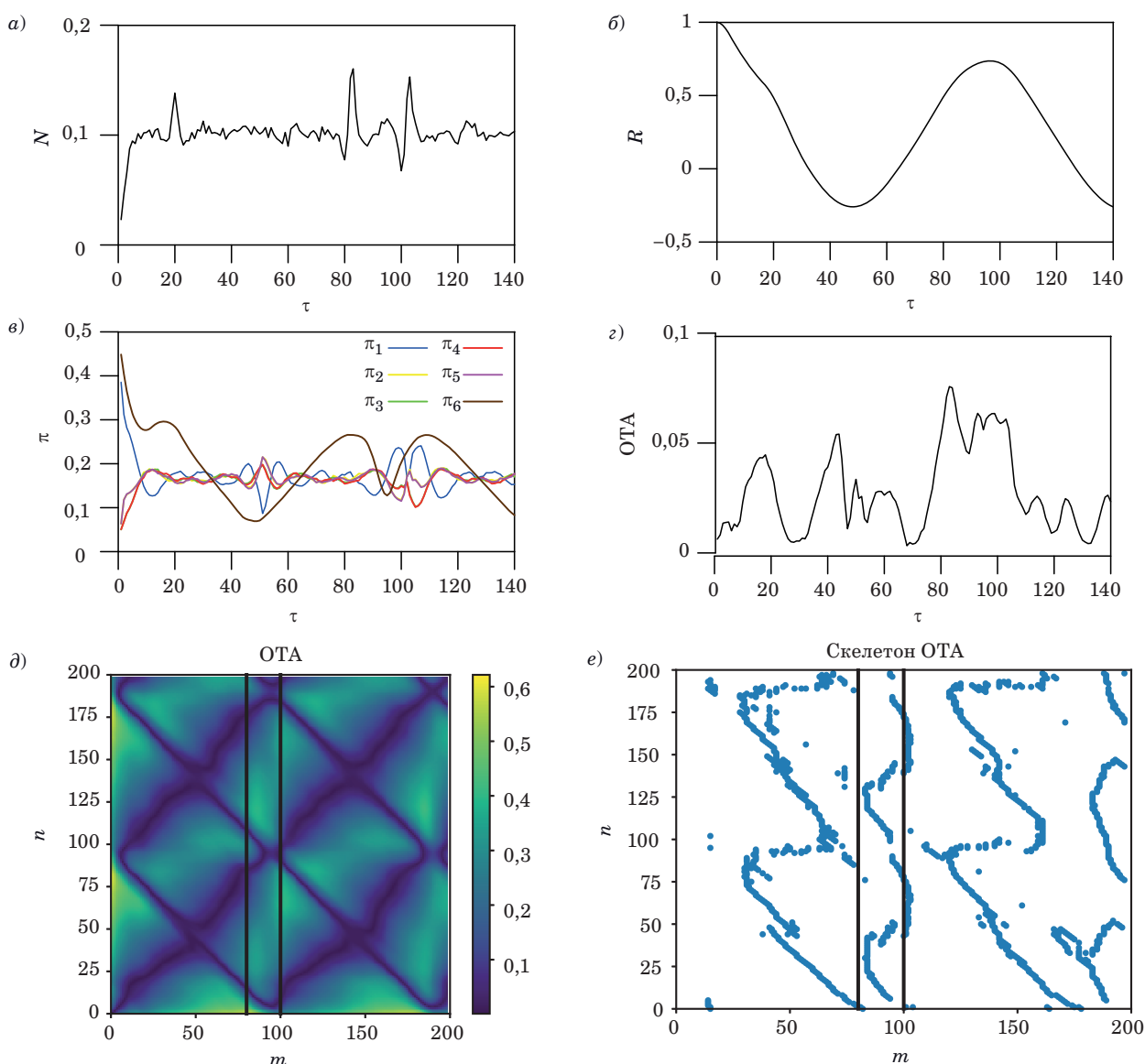
Так же, как и для системы с одним временем запаздывания, описанные методы применялись к временному ряду системы (5).

Метод статистики экстремумов дает точные значения обоих времен запаздывания, соответствующих минимумам на рис. 2, *a*. Автокорреляционная функция  $R(\tau)$  демонстрирует единственный максимум на  $\tau = 97$  (рис. 2, *b*), так что в этом случае оценить задержки по временному ряду не удастся.

Результаты использования метода порядковой временной асимметрии представлены

на рис. 2, в, г. Графики вероятности порядковых паттернов с  $D = 3$  (см. рис. 2, в) построены в зависимости от лага  $\tau$  для системы (5). Полученные зависимости сложно интерпретировать, поскольку они содержат целый ряд экстремумов, не соответствующих ни одному из времен запаздывания. В суммарном значении порядковой временной асимметрии ОТА на рис. 2, г также есть целый ряд максимумов, которые не соответствуют ни одному из времен запаздывания.

В модифицированном методе порядковой временной асимметрии (рис. 2, д) временам запаздывания соответствуют горизонтальные и вертикальные светлые полосы, отражающие максимальные величины ОТА. По максимальным значениям можно провести вертикальные полосы при  $m = 83$  и  $m = 102$ , что является достаточно близкой оценкой времен запаздывания в системе (5). Смещение оценки в большую сторону связано с наличием инерционности в системе. Для иллюстрации на рисунке проведены верти-



■ **Рис. 2.** Примеры применения выбранных мер к временному ряду системы (5): а – статистика экстремумов; б – автокорреляционная функция; в – вероятности порядковых паттернов с  $D = 3$ ; г – порядковая временная асимметрия ОТА; д – модифицированная порядковая временная асимметрия; е – скелетон модифицированной порядковой временной асимметрии

■ **Fig. 2.** Examples of applying the selected measures to the time series of the system (5): а – statistics of extrema; б – autocorrelation function; в – ordinal patterns probabilities with  $D = 3$ ; г – ordinal temporal asymmetry ОТА; д – modified ordinal temporal asymmetry; е – modified ordinal temporal asymmetry skeleton

кальные черные линии, соответствующие временам задержки в системе (5).

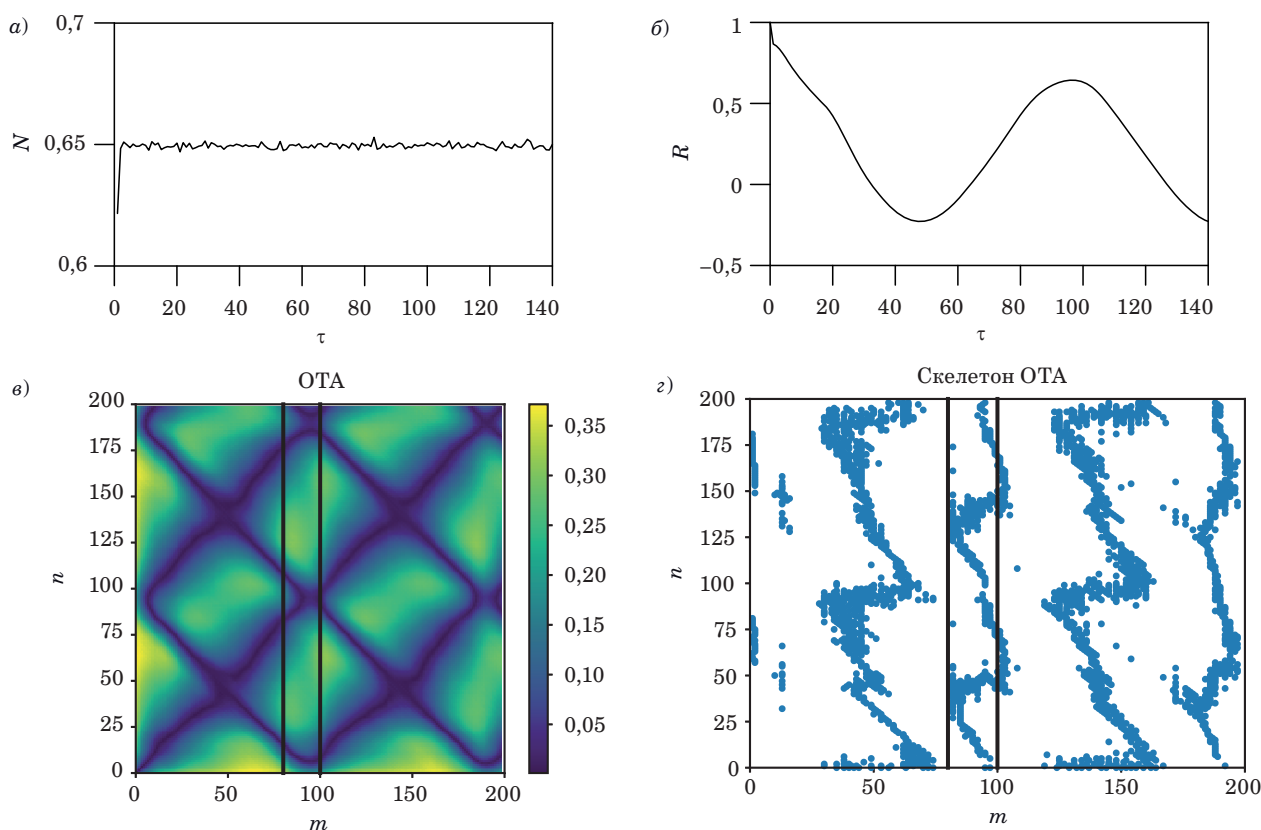
Более наглядно времена запаздывания определяются по скелетону (рис. 2, е). Этот рисунок представляет собой не такую прямую линию, как это было для системы с одним запаздыванием (см. рис. 1, е), а извилистую линию с границей слева 83, справа — 102. Эти границы представляют собой оценку времен запаздывания в системе. Вертикальные черные линии, проведенные на рис. 2, е, как и на рис. 2, д, соответствуют временам запаздывания 80 и 100 в уравнении (5).

«Присутствие шума во временных рядах приводит к появлению дополнительных экстремумов, не связанных с собственной динамикой системы с запаздыванием. Вследствие высокочастотного шума вероятность обнаружить пару экстремумов на удалении  $\tau$  друг от друга в общем случае должна возрасти. В результате с увеличением уровня шума наблюдается увеличение среднего значения  $N$ . Вероятность обнаружить пару экстремумов на удалении  $\tau_1$  друг от друга тоже растет. Однако при не слишком больших

уровнях шума эта вероятность все же меньше, чем вероятность встретить пару экстремумов на удалении  $\tau \neq \tau_1$ . То есть качественные особенности зависимости  $N(\tau)$ , обусловленные динамикой системы с запаздыванием, сохраняются при умеренном шуме» [24].

На рис. 3 представлены расчеты метода статистики экстремумов, автокорреляционной функции и модифицированного метода порядковой временной асимметрии при достаточно большой дисперсии аддитивного шума, равной 0,5 [что составляет 15 % дисперсии сигнала системы (5)]. При этом минимумы в статистике экстремумов не видны совсем (рис. 3, а), а экстремумы становятся распределенными по временному ряду почти равномерно. В первую очередь это связано с плохой оценкой производной, что также нами отмечалось в работе [24]. Автокорреляционная функция практически не изменилась, демонстрируя один максимум на времени запаздывания 97, как и в примере без шума (рис. 3, б).

В то же время следует отметить хорошую работу модифицированного метода порядковой временной асимметрии, предложенного в данной



■ **Рис. 3.** Примеры применения выбранных мер к временному ряду системы (5) с добавленным шумом: а — статистика экстремумов; б — автокорреляционная функция; в — модифицированная порядковая временная асимметрия ОТА; г — скелетон модифицированной порядковой временной асимметрии

■ **Fig. 3.** Examples of applying the selected measures to the time series of system (5) with additive noise: а — statistics of extrema; б — autocorrelation function; в — modified ordinal temporal asymmetry ОТА; г — modified ordinal temporal asymmetry skeleton

статье (рис. 3, в). Светлые области, соответствующие истинным временам запаздывания и максимальным значениям ОТА, также находятся примерно на уровне  $m = 83$  и  $m = 102$ , как и в случае без добавления аддитивного шума. На скелетоне ОТА (рис. 3, г) видны характерные максимумы в районе  $m = 83$  и  $m = 102$ . Вертикальные черные линии соответствуют истинным временам запаздывания 80 и 100 в (5).

## Заключение

В рамках данной работы проведен анализ трех методов оценки времени задержки по временному ряду в автоколебательных системах с запаздыванием и предложена модификация метода, ориентированная на оценку параметров систем с двумя временами запаздывания. Показано, что метод статистики экстремумов хорошо работает при достаточно низких уровнях аддитивного шума для оценки как одного, так и двух времен запаздывания. Метод автокорреляционной функции хорошо работает для систем с одним запаздыванием при небольшом времени инерционности исследуемых систем (по сравнению со временем запаздывания), хотя и дает сме-

щенную оценку. В то же время для систем с двумя временами запаздывания этот метод работает плохо. Метод порядковой временной асимметрии для систем с одним запаздыванием также дает смещенную оценку времени запаздывания, а для систем с двумя временами запаздывания не позволяет хорошо оценить величины времен запаздывания. Модифицированный метод порядковой временной асимметрии в отсутствие аддитивного шума уступает в точности методу статистики экстремумов как для одного, так и для двух времен запаздывания. С другой стороны, при наличии шума в случае анализа систем с двумя запаздываниями модифицированный метод работает лучше других.

Таким образом, при оценке времен запаздывания по временному ряду различных реальных систем необходимо пользоваться всем спектром доступных методов, что позволит более эффективно оценивать параметры исследуемых систем.

## Финансовая поддержка

Работа выполнена в рамках государственного задания СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН № 075-03-2022-016.

## Литература

1. Кислов В. Я., Залогин Н. Н., Мясин Е. А. Исследование стохастических автоколебаний в генераторе с задержкой. *Радиотехника и электроника*, 1979, т. 24, № 6, с. 1118–1130.
2. Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light a ring cavity system. *Optics Communications*, 1979, vol. 30, no. 2, pp. 257–261. doi:10.1016/0030-4018(79)90090-7
3. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, vol. 16, no. 3, pp. 347–355.
4. Zou G., Wang H., and Ji Y. Electro-optic chaos system with time delay signature concealment based on XOR operation and multi-bit PRBS. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, pp. 7327–7341. doi:10.1364/OE.416768
5. Karavaev A. S., Ishbulatov Yu. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Kiselev A. R., Prokhorov M. D. Autonomic control is a source of dynamical chaos in the cardiovascular system. *Chaos*, 2019, vol. 29, 121101. doi:10.1063/1.5134833
6. Ringwood J. V., Malpas S. C. Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model. *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2001, vol. 280, pp. R1105–R1115. doi:10.1152/ajpregu.2001.280.4.R1105
7. Glass L., Mackey M. *From clocks to chaos. The rhythms of life*. Princeton University Press, 1988. 272 p.
8. Karamched B., Hripesak G., Albers D., Ott W. Delay-induced uncertainty for a paradigmatic glucose-insulin model. *Chaos*, 2021, vol. 31, 023142. doi:10.1063/5.0027682
9. Kuang Y. *Delay differential equations with applications in population dynamics*. Academic Press, Boston, 1993. 398 p.
10. Karavaev A. S., Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. An experimental communication scheme based on chaotic time-delay system with switched delay. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2015, vol. 25, no. 10, 1550134. doi:10.1142/S0218127415501345
11. Kingni S. T., Ainamon C., Tamba V. V., Orou B. C. Directly modulated semiconductor ring lasers: Chaos synchronization and applications to cryptography communications. *Chaos Theory and Applications*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 31–39. <https://dergipark.org.tr/en/pub/chaos/issue/53876/730370> (дата обращения: 05 августа 2021).
12. Bai J., Wang H., and Ji Y. Time-delay signature concealing electro-optic chaotic system with multiply feedback nonlinear loops. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, pp. 706–718. doi:10.1364/OE.413941
13. Udaltsov V. S., Larger L., Goedgebuer J. P., Loquet A., Citrin D. S. Time delay identification in cha-



- otic cryptosystems ruled by delay-differential equations. *J. Opt. Technol.*, 2005, vol. 72, iss. 5, pp. 373–377. doi.org/10.1364/JOT.72.000373
14. Zunino L., Soriano M. C., Fischer I., Rosso O. A., Mirasso C. R. Permutation-information-theory approach to unveil delay dynamics from time-series analysis. *Phys. Rev. E*, 2010, vol. 82, no. 4, 046212. doi:10.1103/PhysRevE.82.046212
  15. Voss H., Kurths J. Reconstruction of non-linear time delay models from data by the use of optimal transformations. *Phys. Lett. A*, 1997, vol. 234, iss. 5–6, pp. 336–344. doi:10.1016/S0375-9601(97)00598-7
  16. Ellner S. P., Kendall B. E., Wood S. N., McCauley E., Briggs C. J. Inferring mechanism from time-series data: Delay-differential equations. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1997, vol. 110, iss. 3–4, pp. 182–194. doi:10.1016/S0167-2789(97)00123-1
  17. Bezruchko B. P., Karavaev A. S., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Reconstruction of time-delay systems from chaotic time series. *Phys. Rev. E*, 2001, vol. 64, no. 5, 056216. doi:10.1103/PhysRevE.64.056216
  18. Horbelt W., Timmer J., Voss H. U. Parameter estimation in nonlinear delayed feedback systems from noisy data. *Phys. Lett. A*, 2002, vol. 299, iss. 5–6, pp. 513–521. doi.org/10.1016/S0375-9601(02)00748-X
  19. Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Khorev V. S. Recovery of delay time from time series based on the nearest neighbor method. *Phys. Lett. A*, 2013, vol. 377, iss. 43, pp. 3106–3111. doi:10.1016/j.physleta.2013.09.046
  20. Bandt C., Pompe B. Permutation entropy: A natural complexity measure for time series. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 88, 174102. doi:10.1103/PhysRevLett.88.174102
  21. Fadlallah B., Chen B., Keil A., Principe J. Weighted-permutation entropy: A complexity measure for time series incorporating amplitude information. *Phys. Rev. E*, 2013, vol. 87, 022911. doi:10.1103/PhysRevE.87.022911
  22. Gao X., Zhu W., Yang Q., Zeng D., Deng L., Chen Q., and Cheng M. Time delay estimation from the time series for optical chaos systems using deep learning. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, pp. 7904–7915. doi:10.1364/OE.419654
  23. Soriano M. C., Zunino L. Time-delay identification using multiscale ordinal quantifiers. *Entropy*, 2021, vol. 23, 969. doi:10.3390/e23080969
  24. Пономаренко В. И., Прохоров М. Д., Караваяев А. С., Безручко Б. П. Определение параметров систем с запаздывающей обратной связью по хаотическим временным реализациям. *ЖЭТФ*, 2005, т. 127, вып. 3, с. 515–527.
  25. Porte X., D’Huys O., Jungling T., Brunner D., Soriano M. C., Fischer I. Autocorrelation properties of chaotic delay dynamical systems: A study on semiconductor lasers. *Physical Review E*, 2014, vol. 90, 052911. doi:10.1103/PhysRevE.90.052911

UDC 530.182

doi:10.31799/1684-8853-2022-6-53-61

EDN: SOYXID

### Estimation of delay times from time series of ring self-oscillatory time-delay systems

V. I. Ponomarenko<sup>a,b</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0002-1579-6465, ponomarenkovi@gmail.com

E. E. Lapsheva<sup>b</sup>, Senior Lecturer, orcid.org/0000-0001-6632-1083

M. D. Prokhorov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., RAS Professor, orcid.org/0000-0003-4069-9410

<sup>a</sup>Saratov Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, 38, Zelyonaya St., 410019, Saratov, Russian Federation

<sup>b</sup>Saratov State University named after N. G. Chernyshevsky, 83, Astrakhanskaya St., 410012, Saratov, Russian Federation

**Introduction:** The problem of delay time estimation in ring self-oscillatory time-delay systems arises in various fields of science and is of great importance in the study of real systems generating chaotic time series. **Purpose:** To conduct a comparative analysis of the operation of methods for the reconstruction of time-delay systems from chaotic time series in the absence and presence of additive noise. **Methods:** Methods for estimating the delay time according to the statistics of extrema, using the autocorrelation function and the method of order time asymmetry are used. Based on the latter method, a method is proposed that is focused on estimating the delay times in systems with two delays. **Results:** We carry out a comparative analysis of the operation of four methods for reconstructing the delay times in self-oscillating time-delay systems from chaotic time series using the example of Ikeda systems with one and two delay times. We demonstrate that in the absence of additive noise, the delay time estimation method based on statistics of extrema is the most accurate one for the case of time series analysis of systems with both one and two delays. In the presence of additive noise, the modified method of order time asymmetry proposed in the work in the case of the analysis of systems with one delay time works no worse than the method of the autocorrelation function and order time asymmetry. In the case of two delay times, the modified order time asymmetry method works better than others. **Practical relevance:** The described methods can have a practical application in estimating the delay time of self-oscillating systems, yet the level of additive noise can affect the accuracy of the estimate.

**Keywords** – time-delay systems, self-oscillating systems, estimation of parameters, reconstruction of equations, chaotic time series.

**For citation:** Ponomarenko V. I., Lapsheva E. E., Prokhorov M. D. Estimation of delay times from time series of ring self-oscillatory time-delay systems. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 53–61 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-6-53-61, EDN: SOYXID

## Financial support

This study was carried out this work within the framework of the state task of SB IRE RAS No. 075-03-2022-016.

## References

- Kislov V. Ya., Zalogin N. N., Miasin E. A. Study of stochastic self-oscillations in a time-delay generator. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1979, vol. 24, no. 6, pp. 1118–1130 (In Russian).
- Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light a ring cavity system. *Optics Communications*, 1979, vol. 30, no. 2, pp. 257–261. doi:10.1016/0030-4018(79)90090-7
- Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, vol. 16, no. 3, pp. 347–355.
- Zou G., Wang H., and Ji Y. Electro-optic chaos system with time delay signature concealment based on XOR operation and multi-bit PRBS. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, pp. 7327–7341. doi:10.1364/OE.416768
- Karavaev A. S., Ishbulatov Yu. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Kiselev A. R., Prokhorov M. D. Autonomic control is a source of dynamical chaos in the cardiovascular system. *Chaos*, 2019, vol. 29, 121101. doi:10.1063/1.51348
- Ringwood J. V., Malpas S. C. Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model. *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2001, vol. 280, pp. R1105–R1115. doi:10.1152/ajpregu.2001.280.4.R1105
- Glass L., Mackey M. *From clocks to chaos. The rhythms of life*. Princeton University Press, 1988. 272 p.
- Karamched B., Hripcsak G., Albers D., Ott W. Delay-induced uncertainty for a paradigmatic glucose-insulin model. *Chaos*, 2021, vol. 31, 023142. doi:10.1063/5.0027682
- Kuang Y. *Delay differential equations with applications in population dynamics*. Academic Press, Boston, 1993. 398 p.
- Karavaev A. S., Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. An experimental communication scheme based on chaotic time-delay system with switched delay. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2015, vol. 25, no. 10, 1550134. doi:10.1142/S0218127415501345
- Kingni S. T., Ainamon C., Tamba V. V., Orou B. C. Directly modulated semiconductor ring lasers: Chaos synchronization and applications to cryptography communications. *Chaos Theory and Applications*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 31–39. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/pub/chaos/issue/53876/730370> (accessed 5 August 2021).
- Bai J., Wang H., and Ji Y. Time-delay signature concealing electro-optic chaotic system with multiply feedback nonlinear loops. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, pp. 706–718. doi:10.1364/OE.413941
- Udaltsov V. S., Larger L., Goedgebuer J. P., Locquet A., Citrin D. S. Time delay identification in chaotic cryptosystems ruled by delay-differential equations. *J. Opt. Technol.*, 2005, vol. 72, iss. 5, pp. 373–377. doi.org/10.1364/JOT.72.000373
- Zunino L., Soriano M. C., Fischer I., Rosso O. A., Mirasso C. R. Permutation-information-theory approach to unveil delay dynamics from time-series analysis. *Phys. Rev. E*, 2010, vol. 82, no. 4, 046212. doi:10.1103/PhysRevE.82.046212
- Voss H., Kurths J. Reconstruction of non-linear time delay models from data by the use of optimal transformations. *Phys. Lett. A*, 1997, vol. 234, iss. 5–6, pp. 336–344. doi:10.1016/S0375-9601(97)00598-7
- Ellner S. P., Kendall B. E., Wood S. N., McCauley E., Briggs C. J. Inferring mechanism from time-series data: Delay-differential equations. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1997, vol. 110, iss. 3–4, pp. 182–194. doi:10.1016/S0167-2789(97)00123-1
- Bezruchko B. P., Karavaev A. S., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Reconstruction of time-delay systems from chaotic time series. *Phys. Rev. E*, 2001, vol. 64, no. 5, 056216. doi:10.1103/PhysRevE.64.056216
- Horbelt W., Timmer J., Voss H. U. Parameter estimation in nonlinear delayed feedback systems from noisy data. *Phys. Lett. A*, 2002, vol. 299, iss. 5–6, pp. 513–521. doi.org/10.1016/S0375-9601(02)00748-X
- Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Khorev V. S. Recovery of delay time from time series based on the nearest neighbor method. *Phys. Lett. A*, 2013, vol. 377, iss. 43, pp. 3106–3111. doi:10.1016/j.physleta.2013.09.046
- Bandt C., Pompe B. Permutation entropy: A natural complexity measure for time series. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 88, 174102. doi:10.1103/PhysRevLett.88.174102
- Fadlallah B., Chen B., Keil A., Principe J. Weighted-permutation entropy: A complexity measure for time series incorporating amplitude information. *Phys. Rev. E*, 2013, vol. 87, 022911. doi:10.1103/PhysRevE.87.022911
- Gao X., Zhu W., Yang Q., Zeng D., Deng L., Chen Q., and Cheng M. Time delay estimation from the time series for optical chaos systems using deep learning. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, pp. 7904–7915. doi:10.1364/OE.419654
- Soriano M. C., Zunino L. Time-delay identification using multiscale ordinal quantifiers. *Entropy*, 2021, vol. 23, 969. doi:10.3390/e23080969
- Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Karavaev A. S., Bezruchko B. P. Recovery of parameters of delayed-feedback systems from chaotic time series. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2005, vol. 100, pp. 457–467 (In Russian). doi:10.1134/1.1901758
- Porte X., D’Huys O., Jungling T., Brunner D., Soriano M. C., Fischer I. Autocorrelation properties of chaotic delay dynamical systems: A study on semiconductor lasers. *Physical Review E*, 2014, vol. 90, 052911. doi:10.1103/PhysRevE.90.052911

**АЗАРОВ**  
**Артур**  
**Александрович**



Заместитель директора Северо-Западного института управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы, Санкт-Петербург. В 2011 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет по специальностям «Прикладная информатика в международных отношениях» и «Экономика». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 140 научных публикаций и 13 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и баз данных. Область научных интересов – информационная безопасность, анализ данных, машинное обучение и др.  
Эл. адрес: artur-azarov@yandex.ru

**БЕРЕСОВА**  
**Алина**  
**Максимовна**



Ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2021 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информационная безопасность». Является автором 16 научных публикаций. Область научных интересов – теория информации, теория кодирования, низкоплотностные коды, каналы с памятью.  
Эл. адрес: amveresova@gmail.com

**ВОРОНКОВА**  
**Анна**  
**Владимировна**



Старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий. В 2012 году окончила с отличием Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы». В 2016 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 44 научных публикаций, одного патента на изобретение, трех патентов на полезную модель. Область научных интересов – микроволновая фотоника, волоконная оптика, интегральная фотоника.  
Эл. адрес: voronkova.av@ugatu.su

**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

**ВОРОНКОВ**  
**Григорий**  
**Сергеевич**



Старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий. В 2007 году окончил с отличием Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Средства связи с подвижными объектами». В 2017 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 62 научных публикаций. Область научных интересов – обработка сигналов, интегральная фотоника, СВЧ-сигналы.  
Эл. адрес: voronkov.gs@ugatu.su

**ГРАХОВА**  
**Елизавета**  
**Павловна**



Заведующий НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий. В 2012 году окончила с отличием Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Средства связи с подвижными объектами». В 2016 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций, двух патентов на изобретения, четырех патентов на полезную модель. Область научных интересов – микроволновая фотоника, обработка сигналов, антенная техника.  
Эл. адрес: grakhova.ep@ugatu.su



**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 24 научных публикаций. Область научных интересов – компьютерная алгебра, компьютерное моделирование, дискретная математика. Эл. адрес: vsduzhin@etu.ru

**ЗАКОЯН**  
**Аида**  
**Гайковна**



Магистрант, аналитик НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий. В 2021 году окончила с отличием Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов – интегральная фотоника, спутниковые системы связи, астрономическая спектроскопия. Эл. адрес: zakoyan.ag@ugatu.su

**ИВАНОВ**  
**Владислав**  
**Викторович**



Младший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий. В 2017 году окончил с отличием Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи». Является автором 10 научных публикаций. Область научных интересов – обработка сигналов, интегральная фотоника. Эл. адрес: ivanov.vv@ugatu.su

**ЖУРБА**  
**Ярослав**  
**Сергеевич**



Магистрант Университета ИТМО по специальности «Программирование и искусственный интеллект». В 2022 году окончил бакалавриат Университета ИТМО по специальности «Прикладная математика и информатика». Область научных интересов – глубокое обучение с подкреплением, оптимизация полярных кодов. Эл. адрес: zhurba\_ys@mail.ru

**ИЦЫКСОН**  
**Владимир**  
**Михайлович**



Директор Высшей школы интеллектуальных систем и суперкомпьютерных технологий Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, руководитель лаборатории верификации и анализа программ JetBrains Research. В 1996 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Информатика и вычислительная техника». В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов – формальные методы, верификация и анализ программ, формальные спецификации, качество программного обеспечения. Эл. адрес: vlad@icc.spbstu.ru

**КУЗЬМИН**  
**Артем**  
**Дмитриевич**



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



**КУТЛУЯРОВ  
Руслан  
Владимирович**



Старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий.

В 2008 году окончил с отличием Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 45 научных публикаций.

Область научных интересов — микроволновая фотоника, интегральная фотоника, нелинейная оптика, волоконная оптика, квантовые коммуникации.

Эл. адрес:  
kutluyarov.rv@ugatu.su

**ЛАПШЕВА  
Елена  
Евгеньевна**



Руководитель образовательного центра непрерывной подготовки IT-специалистов, старший преподаватель кафедры информатики и программирования Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

В 1992 году окончила Саратовский государственный университет по специальности «Прикладная математика», в 2017 году — магистратуру по специальности «Биотехнические системы и технологии».

Является автором более 30 научных публикаций и трех свидетельств о регистрации программ. Область научных интересов — машинное обучение, обработка сигналов.

Эл. адрес: lapsheva@gmail.com

**ЛЮБОПЫТОВ  
Владимир  
Сергеевич**



Старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий.

В 2008 году окончил с отличием Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 49 научных публикаций.

Область научных интересов — микроволновая фотоника, интегральная фотоника, нелинейная оптика, волоконная оптика, квантовые коммуникации.

Эл. адрес:  
lyubopytov.vs@ugatu.su

**ОВЧИННИКОВ  
Андрей  
Анатольевич**



Доцент кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2000 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информационные системы в экономике».

В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций и семи международных патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория помехоустойчивого кодирования, кодовая криптография. Эл. адрес: mldoc@mail.ru

**ПОНОМАРЕНКО  
Владимир  
Иванович**



Доцент, ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, профессор Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

В 1982 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика и электроника».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Является автором более 300 научных публикаций, пяти патентов на изобретения и авторских свидетельств.

Область научных интересов — хаотическое поведение нелинейных систем и др.

Эл. адрес:  
ponomarenkovi@gmail.com

**ПРОХОРОВ  
Михаил  
Дмитриевич**



Доцент, заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

В 1992 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 200 научных публикаций. Область научных интересов — нелинейные колебания и волны, математическое моделирование, анализ временных рядов, системы передачи информации.

Эл. адрес:  
mdprokhorov@yandex.ru

**СТЕПАНОВ  
Даниил  
Сергеевич**



Старший преподаватель Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

В 2018 году окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Является автором четырех научных публикаций.

Область научных интересов – верификация и анализ программ, автоматическая генерация тестов, фаззинг компиляторов.

Эл. адрес: [stepanov0995@gmail.com](mailto:stepanov0995@gmail.com)

**СТЕПАНОВ  
Иван  
Васильевич**



Инженер кафедры телекоммуникационных систем Уфимского университета науки и технологий.

В 2020 году окончил с отличием Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи».

Является автором десяти научных публикаций.

Область научных интересов – интегральная фотоника, оптическая когерентная томография. Эл. адрес: [stepanov.iv@ugatu.ru](mailto:stepanov.iv@ugatu.ru)

**ФИЛЬЧЕНКОВ  
Андрей  
Александрович**



Доцент факультета информационных технологий и программирования, руководитель лаборатории машинного обучения Университета ИТМО, Санкт-Петербург.

В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором 240 научных публикаций и 17 патентов на изобретения.

Область научных интересов – автоматическое машинное обучение, анализ и генерация изображений, анализ социальных данных, выбор признаков.

Эл. адрес: [afilchenkov@itmo.ru](mailto:afilchenkov@itmo.ru)

**ФОМИНЫХ  
Анна  
Александровна**



Магистр кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2022 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Является автором 17 научных публикаций.

Область научных интересов – теория кодирования, теория информации, информационная безопасность, сети и телекоммуникации.

Эл. адрес: [aawat@ya.ru](mailto:aawat@ya.ru)

**ШАЛЫТО  
Анатолий  
Абрамович**



Профессор факультета информационных технологий и программирования Университета ИТМО, Санкт-Петербург, ученый секретарь НИОУ «Аврора».

В 1971 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

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

Является автором более 250 научных публикаций, трех монографий и 70 изобретений.

Область научных интересов – системы логического управления, автоматное программирование.

Эл. адрес: [shalyto@mail.ifmo.ru](mailto:shalyto@mail.ifmo.ru)

# СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» ЗА 2022 г. [№ 1–6]

	№	Стр.
Abdullin A. M., Itsykson V. M. Kex: A platform for analysis of JVM programs	1	30
Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M. Analyzing and stabilizing multichannel ALOHA with the use of the preamble-based exploration phase	5	49
Doković D. Ž. Some new symmetric Hadamard matrices	2	2
Gryzunov V. V. Model of a distributed information system solving tasks with the required probability	1	19
Krestovnikov K. D., Erashov A. A. Signal processing of capacitive force sensors installed in the foot of an anthropomorphic robot	4	20
Moldovyan A. A., Moldovyan D. N., Moldovyan N. A. A novel method for developing post-quantum digital signature algorithms on non-commutative associative algebras	1	44
Ovchinnikov A. A. The variant of post-quantum cryptosystem based on burst-correcting codes and on the complete decoding problem	3	45
Ovchinnikov A. A., Veresova A. M., Fominykh A. A. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events	6	41
Stepanov D. S., Itsykson V. M. Backend Bug Finder – a platform for effective compiler fuzzing	6	31
Titov V. E., Dick O. E. Frequency analysis based on synchrosqueezed wavelet transforms of brain and heart rhythms in cases of cerebral vascular pathology	2	53
Vassiliev N. N., Duzhin V. S., Kuzmin A. D. Modeling of bumping routes in the RSK algorithm and analysis of their approach to limit shapes	6	2
Адёркина А. А., Синицын А. С. Разработка автоматизированного программного инструмента на основе методов машинного обучения для решения задач радиопланирования на участках метрополитена	5	32
Арсеньев В. Н., Ядренкин А. А. Выбор заданного космического объекта из множества наблюдаемых специализированным космическим аппаратом	2	11
Балонин Н. А., Сергеев А. М. Матрицы Адамара как результат произведения Скарпи без циклического смещения блоков	3	2
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Критские матрицы Одина и Тени, сопровождающие простые числа и их степени	1	2
Браницкий А. А., Шарма Я. Д., Котенко И. В., Федорченко Е. В., Красов А. В., Ушаков И. А. Определение психического состояния пользователей социальной сети Reddit на основе методов машинного обучения	1	8
Воронков Г. С., Закоян А. Г., Иванов В. В., Воронкова А. В., Степанов И. В., Грахова Е. П., Любопытов В. С., Кутлюяров Р. В. Полностью интегральная оптическая сенсорная система с интеррогацией по интенсивности	6	20
Горбунова А. В., Вишнеvский В. М. Оценка времени отклика среды для вычислений с интенсивным использованием данных	4	12
Двойникова А. А., Кагиров И. А., Карпов А. А. Аналитический обзор методов автоматического распознавания вовлеченности пользователя в виртуальную коммуникацию	5	12
Журба Я. С., Фильченков А. А., Азаров А. А., Шалыто А. А. Алгоритмы непрерывного управления для маршрутизации конвейера на основе мультиагентного глубокого обучения с подкреплением	6	10
Инвестиционная платформа «Инвестиционный Компас» на службе внедрения разработок российских ученых	3	67
Исаева О. С., Исаев С. В., Кулясов Н. В. Формирование адаптивных рассылок брокера данных интернета вещей	5	23

Кузьмин В. Н., Менисов А. Б. Исследование путей и способов повышения результативности выявления компьютерных атак на объекты критической информационной инфраструктуры	4	29
Ле Д. Ч., Фам М. Х., Динь Ч. З., До Х. Ф. Применение алгоритмов машинного обучения для обнаружения вредоносных программ в операционной системе Windows с помощью PE-заголовка	4	44
Лебедев И. С. Адаптивное применение моделей машинного обучения на отдельных сегментах выборки в задачах регрессии и классификации	3	20
Левин Д. В., Паршуткин А. В., Тимошенко А. В. Достоверность селекции целей в сети разнесенных радиолокационных станций при совместной обработке радиолокационной информации в условиях ретранслированных помех	3	55
Липатников В. А., Шевченко А. А., Косолапов В. С., Сокол Д. С. Метод обеспечения информационной безопасности сети VoIP-телефонии с прогнозом стратегии вторжений нарушителя	1	54
Петров А. А., Никифоров И. В., Устинов С. М. Алгоритм миграции ESXi-кластеров между разными vCenter серверами с возможностью возврата к исходной конфигурации	2	20
Пименов А. В., Федоров И. Р., Беззатеев С. В. Построение архитектуры туманных вычислений с использованием технологии блокчейн	5	40
Пономаренко В. И., Лапшева Е. Е., Прохоров М. Д. Оценка времен задержки по временным рядам кольцевых автоколебательных систем с запаздыванием	6	53
Пчелинцев С. Ю., Ляшков М. А., Ковалева О. А. Метод создания синтетических наборов данных для обучения нейросетевых моделей распознаванию объектов	3	9
Смирнов А. В., Тесля Н. Н. Выбор эффективных стратегий действий участников процесса госпитализации с использованием нечеткой кооперативной игры и генетического алгоритма	2	42
Сухов А. М. Оценивание эффективности процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности на основе теории стохастической индикации	3	31
Тимофеев А. Л., Султанов А. Х., Мешков И. К., Гизатулин А. Р. Использование спектрального подхода при обработке изображений и произвольных данных	4	2
Тырышкина Е. С., Тумковский С. Р. Метод ускорения объединения распределенных наборов данных по заданному критерию	5	2
Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Чураков П. П., Юлдашев З. М., Бофанова Н. С., Алимуратов А. К., Горбунов В. Н., Золотарев Р. В., Никитин М. С. Поиск закономерностей на ЭЭС при симуляции тревожно-фобической ситуации в среде виртуальной реальности	4	58
Шелест М. Н. Анализ средней задержки для одной модели сети массового обслуживания с резервированием ресурсов	2	32
Сведения об авторах	1	68
Сведения об авторах	2	62
Сведения об авторах	3	69
Сведения об авторах	4	68
Сведения об авторах	5	60
Сведения об авторах	6	62



## 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://guap.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, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)