

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 4 (56)

2020

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- Иванов А. И., Малыгина Е. А., Лукин В. С.* Компактная графическо-иероглифная система отображения схем многообразных нейросетевых вычислений ..... 5
- Лукин В. С.* Сравнение мощности обычной и логарифмической форм статистических критериев среднего гармонического при использовании для проверки гипотезы нормального распределения данных малой выборки ..... 19
- Тычков А. Ю., Грачев А. В., Алимуратов А. К., Чураков П. П.* Исследование особенностей передачи мультимедийной и параметрической информации в среде виртуальной реальности ..... 27
- Черников А. А., Пуртов А. И., Прокофьев И. В., Ющенко В. П.* Алгоритм обнаружения и классификации объектов на неоднородном фоне... 39
- Головнин О. К., Прохоров С. А., Столбова А. А.* Обработка временных рядов измерительной информации на основе интеллектуального анализа вейвлет-спектров в системах диагностики состояния покрытия автомобильных дорог при обнаружении поверхностных дефектов ..... 47
- Волчихин В. И., Зинкин С. А., Карамышева Н. С.* Концептуальные модели функциональной архитектуры мобильных реконфигурируемых агентно-ориентированных распределенных вычислительных систем..... 65

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА**

- Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Кравцов А. Н., Александров В. С., Берзинская М. В.* Разработка технологии спрей-пиролиза для синтеза прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова .... 92
- Муромцев Д. Ю., Жуков В. М.* Информационно-управляющая система антенным согласующим устройством с сосредоточенными элементами настройки ..... 104
- Ашанин В. Н., Коротков А. А.* Анализ результатов модельного исследования способов компенсации погрешности от краевых эффектов в  $\Sigma T$ -АЦП ..... 115

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

---

*Кушнарченко В. М., Репях В. С., Тавтилов И. Ш., Решетов С. Ю.*

Причины повреждений муфт насосно-компрессорных труб ..... 122

*Зверовщиков А. Е., Лебедев Г. Г., Гурин П. А.* Исследования изменения

состояния технологической среды при гидроабразивной обработке ..... 135

**UNIVERSITY PROCEEDINGS  
VOLGA REGION  
ENGINEERING SCIENCES**

№ 4 (56)

2020

**CONTENT**

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER  
ENGINEERING AND CONTROL**

- Ivanov A. I., Malygina E. A., Lukin V. S.* A compact graphic and hieroglyphic system for displaying schemes of diverse neural network calculations ..... 5
- Lukin V. S.* Comparison of the general logarithmic forms' power of statistical criteria of the harmonic mean using the hypothesis of normal distribution of small sample data..... 19
- Tychkov A. Yu., Grachev A. V., Alimuradov A. K., Churakov P. P.* A research of the features of multimedia and parametric information transmission in the virtual reality systems..... 27
- Chernikov A. A., Purtov A. I., Prokof'ev I. V., Yushchenko V. P.* Algorithm for objects' detecting and classification on a heterogeneous background..... 39
- Golovnin O. K., Prokhorov S. A., Stolbova A. A.* Processing time series of measurements based on the wavelet spectra intellectual analysis in survey systems for road pavement defects detection ..... 47
- Volchikhin V. I., Zinkin S. A., Karamysheva N. S.* Conceptual models of functional architecture of mobile reconfigurable agent-oriented distributed computing systems ..... 65

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT  
AND RADIO ENGINEERING**

- Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Kravtsov A. N., Aleksandrov V. S., Berzhinskaya M. V.* A development of spray-pyrolysis technology for synthesis of transparent conductive coatings based on tin dioxide ..... 92
- Muromtsev D. Yu., Zhukov V. M.* Antenna-matching-device-based information and control system with centered tuning elements..... 104
- Ashanin V. N., Korotkov A. A.* Simulation results analysis of methods to compensate errors caused by boundary effects in  $\Sigma\Delta$ -ADC ..... 115

## MACHINE SCIENCE AND BUILDING

---

- Kushnarenko V. M., Repyakh V. S., Tavtilov I. Sh., Reshetov S. Yu.*  
Causes of damages of pump-compressor pipe clutches.....122
- Zverovshchikov A. E., Lebedev G. G., Gurin P. A.* The research of changes  
in the technological environment state during hydroabrasive treatment .....135

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

УДК 004.056; 004.032.26

DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-1

*А. И. Иванов, Е. А. Малыгина, В. С. Лукин*

## КОМПАКТНАЯ ГРАФИЧЕСКО-ИЕРОГЛИФНАЯ СИСТЕМА ОТОБРАЖЕНИЯ СХЕМ МНОГООБРАЗНЫХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ<sup>1</sup>

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Целью данной работы является попытка устранить неоднозначности словесного описания и графических отображений схем многообразных нейросетевых вычислений при одновременном уменьшении объема текстовой и графической информации.

*Материалы и методы.* Предложено, по аналогии со стандартным описанием Булевой логики, ввести конечное число обозначений типов искусственных нейронов. Также предложено при графическом отображении искусственных нейронов воспользоваться элементами иероглифического формирования изображений (гладкие овалы – это континуальные преобразования, а угловатые прямоугольники – это операции квантования континуальных данных). При использовании искусственных нейронов с многоуровневым квантованием их прямоугольные квантователи получают несколько выходов.

*Результаты.* Предложенный вариант стандартизации алфавита графических обозначений приводит к снижению неоднозначности графических иллюстраций схем многообразных нейросетевых вычислений и росту компактности создаваемых иллюстрационных материалов.

*Выводы.* Предложенная схема формирования графико-иероглифических иллюстраций компактна (не приводит к появлению тысяч иероглифов) и позволяет с использованием малого числа основных образов наглядно иллюстрировать подавляющее большинство известных авторам схем нейросетевых вычислений.

**Ключевые слова:** классификация искусственных нейронов, графическое отображение нейронов, элементы иероглифических записей.

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ, проект № 19).

© Иванов А. И., Малыгина Е. А., Лукин В. С., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

## A COMPACT GRAPHIC AND HIEROGLYPHIC SYSTEM FOR DISPLAYING SCHEMES OF DIVERSE NEURAL NETWORK CALCULATIONS<sup>1</sup>

### Abstract.

*Background.* The purpose of this article is to try to eliminate ambiguities in the verbal description and graphic representations of schemes of multi-dimensional neural network calculations while reducing the volume of text and graphic information.

*Materials and methods.* By the analogy with the standard description of Boolean logic, it is proposed to introduce a finite number of designations for the types of artificial neurons. It is also proposed to use elements of hieroglyphic image formation when graphically displaying artificial neurons (smooth ovals are continual transformations, and angular rectangles are operations for quantizing continuous data). When artificial neurons with multilevel quantization are used, their rectangular quantizers get several outputs.

*Results.* The proposed standardization version of the alphabet of graphic symbols leads to an ambiguity's decrease in the graphic illustrations of schemes for diverse neural network calculations and an increase in the compactness of the created illustrative materials.

*Conclusions.* The proposed scheme for the formation of graphic and hieroglyphic illustrations is compact (does not lead to the appearance of thousands of hieroglyphs) and allows using a small number of basic images to visually illustrate the vast majority of neural network calculation schemes known to the authors.

**Keywords:** classification of artificial neurons, graphic representation of neurons, elements of hieroglyphic records.

### Общие положения нейроинформатики

В настоящее время значительная часть искусственных нейронов обогащает входные относительно бедные континуальные данные путем их взвешенного суммирования в линейном пространстве:

$$y = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_i + c, \quad (1)$$

где  $n$  – размерность входного пространства;  $x_i$  – входные непрерывные данные;  $\mu_i$  – подбираемые при обучении весовые коэффициенты.

Далее уже накопленные (уже обогащенные) данные преобразуются некоторой гладкой нелинейной функцией (например, сигмоидной функцией [1–3]):

$$f(y) = \frac{1}{1 + \exp(-a \cdot y)}, \quad (2)$$

где  $a$  – параметр настройки гладкой функции возбуждения.

---

<sup>1</sup> Acknowledgments: The reported study was funded by Russian Ministry of Science (information security, project 19).

Вместо сигмоидной функции активации (2) может использоваться любая иная гладкая функция, однако все они должны быть гладкими (везде дифференцируемыми или аналитическими). В этом случае искусственный нейрон является некоторым нелинейным редуктором (понижателем) размерности. Нейрон входной  $n$ -мерный континуум свертывает до выходного одномерного континуума.

На рис. 1 нейрон, выполняющий континуальную редукцию, отображен в левой верхней части. Континуальный характер входных данных условно отображен в виде гладкого эллипса, охватывающего линейный сумматор. Континуальный характер функции активации также отображается в виде гладкого эллипса ее охватывающего.

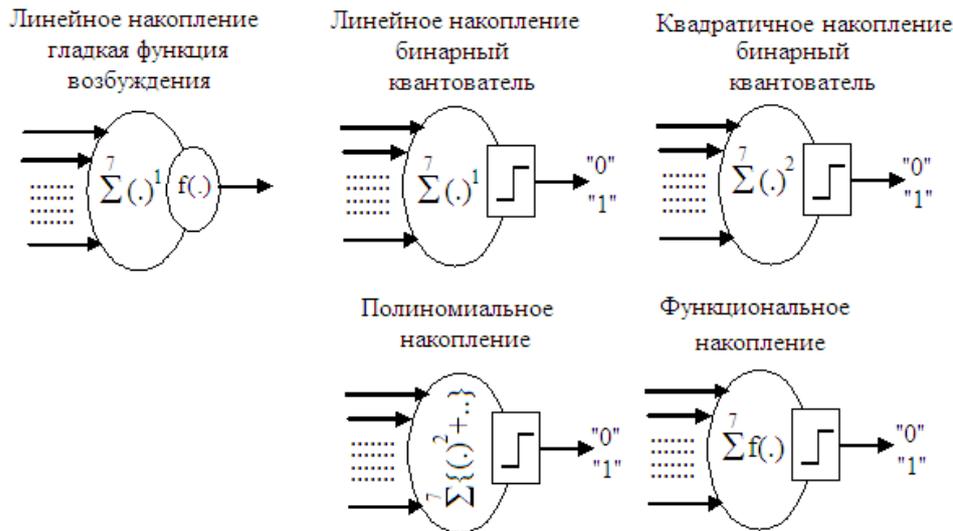


Рис. 1. Варианты графического отображения различных типов искусственных нейронов

В биометрии важную роль играют искусственные нейроны с накоплением данных в линейном пространстве и их квантованием после обогащения (персептроны Розенблатта [1, 2]). Главная их особенность состоит в том, что они одновременно с функцией редукции входной размерности выполняют функцию квантования:

$$\begin{cases} y = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_i, \\ "z(y)" \leftarrow "0" \text{ if } y < k, \\ "z(y)" \leftarrow "1" \text{ if } y \geq k, \end{cases} \quad (3)$$

где  $k$  – порог квантователя с двумя дискретными выходными состояниями «0» и «1».

Следует отметить, что в записи (3) одновременно присутствуют непрерывные данные  $\{y, \mu, x, k\}$  и дискретные данные – « $z(\cdot)$ ». Для исключения путаницы используются кавычки «.», как это принято при программировании.

Графическое отображение персептрона дано вверху в центре (рис. 1). Дискретный характер операций квантования подчеркнут обведением негладким прямоугольником.

Нейросетевой биометрии и ее стандартизации сегодня уделяется значительное внимание [4–9]. Проведенные исследования по автоматическому обучению сетей искусственных нейронов алгоритмом ГОСТ Р 52633.5 [8] выявили ряд уязвимостей. Эти уязвимости частично устраняются при переходе к использованию искусственных нейронов с накоплением данных в квадратичном пространстве, например, нейронов Махалонобиса:

$$\begin{cases} y^2 = [\bar{x} - E(\bar{x})]^T \cdot [r]^{-1} \cdot [\bar{x} - E(\bar{x})], \\ "z(y^2)" \leftarrow "0" \text{ if } y^2 < k, \\ "z(y^2)" \leftarrow "1" \text{ if } y^2 \geq k, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\bar{x}$  – вектор нормированных данных с единичным стандартным отклонением;  $E(\bar{x})$  – вектор математических ожиданий, анализируемых нейроном параметров;  $[r]^{-1}$  – обратная корреляционная матрица анализируемых параметров.

Следует отметить, что при обычной низкоразмерной идентификации образов искусственным нейроном Махалонобиса уделяется мало внимания из-за проблем с вычислением обратной корреляционной матрицы  $[r]^{-1}$ . Для высокоразмерной биометрии эта проблема отсутствует, так как для каждого отдельного искусственного нейрона при выборе связей нейросети всегда можно подобрать практически независимые биометрические параметры [10, 11]. Графическое отображение квадратичных нейронов представлено в верхней правой части рис. 1.

В классической теории обработки данных важную роль играют ортогональные преобразования. В частности, при организации вычислений удобно оказываются конечные ортогональные полиномы Эрмита, Чебышева, Лежандра, т.е. самым простым путем ортогонализации искусственных нейронов является переход к полиномиальным нейронам Эрмита, Чебышева, Лежандра [12]. Графическое отображение нейронов с накоплением данных в полиномиальных пространствах на рис. 1 дано в центре в нижней части.

Очевидным является то, что наряду с конечными ортогональными полиномами могут быть использованы ортогональные преобразования (например, функции базиса Фурье –  $\sin(k\omega)$ ,  $\cos(k\omega)$ ), описывающиеся бесконечными рядами [13]. Могут быть применены и другие функции. Например, нейрон, эквивалентный статистическому критерию Крамера – фон Мизеса [13], для проверки гипотезы нормальности малой выборки должен осуществлять накопление данных в квадратичном пространстве, деформированном под нормальное распределение:

$$\begin{cases} y^2 \leftarrow \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} \{(i - 0,5) - 16 \cdot P(x_i, E, \sigma)\}^2, \\ "z(y^2)" \leftarrow "0" \text{ if } y^2 < k, \\ "z(y^2)" \leftarrow "1" \text{ if } y^2 \geq k, \end{cases} \quad (5)$$

где  $x_i$  – данные малой выборки из 16 опытов;  $P(x_i, E, \sigma)$  – функция вероятности нормального закона;  $E$  – математическое ожидание малой выборки;  $\sigma$  – стандартное отклонение малой выборки.

Таким образом, мы получили систему графических образов рис. 1, которые позволяют наглядно представлять любые схемы нейросетевых вычислений, известные авторам данной работы. Пользуясь предложенной символикой, можно описывать сложные нейросетевые конструкции по аналогии со сложными вычислителями, создававшимися в 70-е гг. прошлого века, из серийно выпускавшихся логических элементов Булевой алгебры.

Пример формирования подобного графического документа приведен на рис. 2, где отображена многослойная сеть искусственных нейронов с гладкими функциями возбуждения. Последний слой сети искусственных нейронов образован персептронами, т.е. отображенная на рисунке многослойная сеть искусственных нейронов глубокого обучения [2, 3] должна откликаться заранее заданным выходным кодом длиной в 256 бит, как это рекомендует пакет национальных стандартов с номерами ГОСТ Р 52633.xx-20xx. Появляется возможность формального описания любых, очень сложных нейросетевых конструкций.

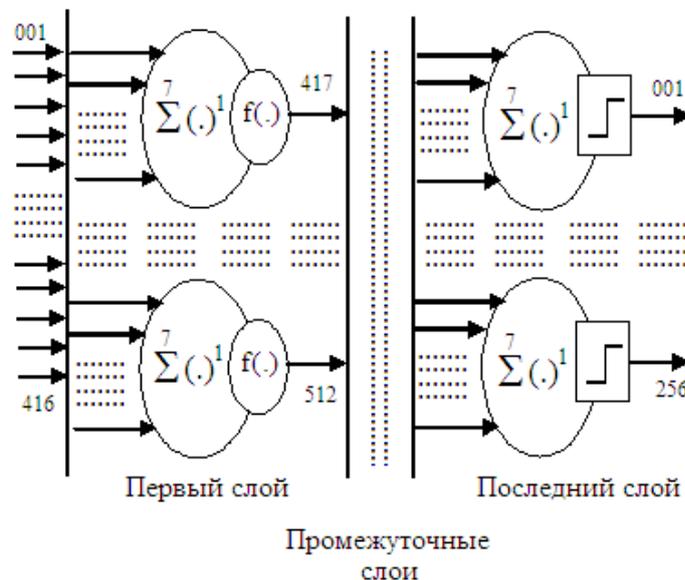


Рис. 2. Пример описания многослойной нейронной сети, состоящей из континуальных нейронов внутренних слоев и персептронов в последнем слое

### Искусственные нейроны с многоуровневыми квантователями

Тот факт, что сегодня активно исследуются искусственные нейроны с большим числом входов и одним выходом, хорошо объясним нашим стремлением все упростить. Гораздо проще иметь дело с одной «хорошей» переменной, чем с десятками «плохих» переменных. Тем не менее формально можно представить себе континуальные редукторы высокой размерности в данные меньшей размерности, например это может быть редуктор, преобразующий 7 входных континуальных размерностей в 2 выходные континуаль-

ные размерности. Такой абстрактный нейрон с 7 входами и 2 выходами изображен в верхней части левой стороны рис. 3. Работ по созданию подобных конструкций нет и, возможно, не появится в ближайшем будущем. В настоящий момент нет актуальных задач, для решения которых понадобятся подобные математические конструкции.

Гораздо более перспективными и, соответственно, востребованными являются нейроны, выполняющие редукцию входной размерности до двух и более выходных битов (два и более бита выходных состояний). Так можно модифицировать все рассмотренные выше искусственные нейроны, что и отображено на рис. 3. Более того, первые искусственные нейроны формировались по образу и подобию наших естественных нейронов. При этом бинарные квантователи персептронов появились как наиболее простое техническое решение, уже демонстрирующее свою работоспособность.

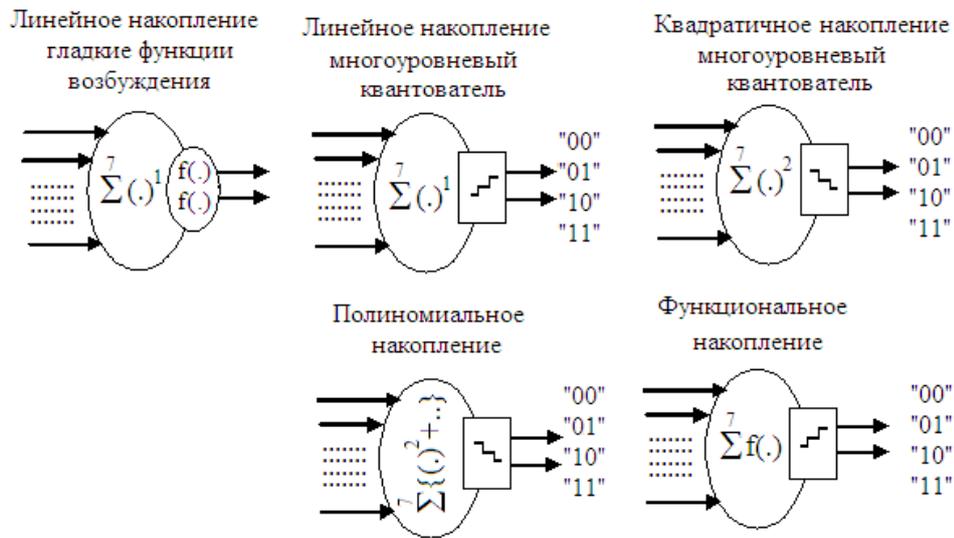


Рис. 3. Искусственные нейроны с двумя выходами

На самом деле естественные нейроны живых существ намного сложнее наших искусственных нейронов [14], они вместо простых бинарных выходов выдают гораздо более сложные выходные последовательности.

Насколько выгодно увеличивать число выходных состояний нейронов с линейным накоплением, удалось оценить только в 2013 г. [15] (только через 2 года после ввода в действие национального стандарта ГОСТ Р 52633.5–2011). Если бы факт значительного роста энтропии кодов «Чужой» был обнаружен ранее, то вариант нейросетей с линейным накоплением данных и тричными квантователями мог войти сегодня в действующий национальный стандарт. В связи с этим мы приводим на рис. 3 нейрон с линейным накоплением и двумя цифровыми выходами.

Дальнейшие исследования показали, что желательное, но необязательное многоуровневое квантование для линейных нейронов становится принципиально важным для нейронов с накоплением данных в квадратичном про-

странстве. Было известно, что квадратичные нейроны лучше решают задачу распознавания «Свой» и «Чужой» [16, 17], однако до 2017 г. [18, 19] их не применяли в преобразователях биометрия-код из-за принципиального дефекта. Все квадратичные нейроны при бинарном квантовании накопленных данных не обеспечивают хэширование данных «Чужой». Этот недостаток удается преодолеть, если только перейти к квантователям с числом выходных состояний более двух [20, 21].

Пример, иллюстрирующий работу 8-уровневого квантователя данных на выходе квадратичного нейрона, приведен на рис. 4.

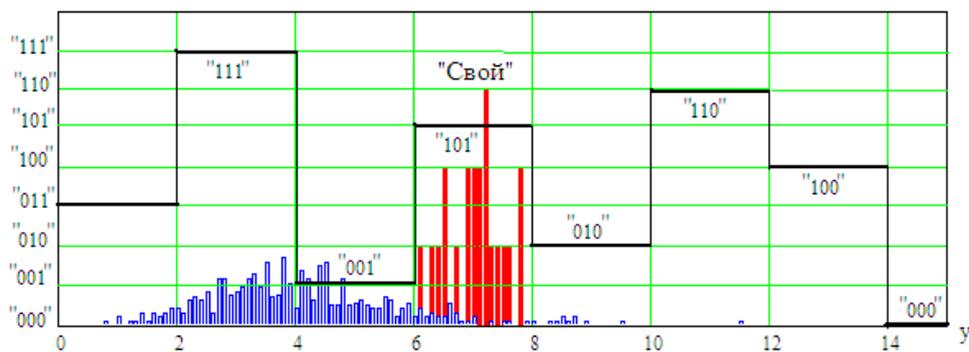


Рис. 4. Пример случайных состояний квантователя квадратичного нейрона, одно из которых соответствует трем битам ключа «Свой»

Классические квадратичные нейроны с бинарным квантованием всегда приводят к попаданию данных «Свой» в первый интервал  $\{0, 2\}$  на рис. 4. Только введение многоуровневого квантователя и специальных мер переноса данных в иной интервал дает желаемый эффект появления хэширующих свойств. Этот рисунок хорошо иллюстрирует ситуацию по выбору числа выходов у квантователя нейронов. Можно пожертвовать частью данных «Все Чужие», если оставить четыре интервала (два выхода). Появление третьего выхода дает 8 выходных состояний, часть из которых оказываются слабо заполненными.

### Графические обозначения для типовых промежуточных операций с образами

В дополнение к многообразию искусственных нейронов целесообразно добавить специфические операции с образами без участия нейронов. Две из таких операций определены в ГОСТ Р 52633.2–2010 [6]. Первая операция отображена на рис. 5.

Эта операция используется после вычисления энтропии 5000 образов «Чужой» тестовой базы и выбора 50 образов с наименьшей энтропией. Для того чтобы восстановить численность исходной базы до исходной численности, ГОСТ Р 52633.2 [6] рекомендует биометрические параметры пар образов-родителей усреднить. Это позволяет получать образы-потомки, одинаково похожие на своих родителей. Повторение описанных выше процедур примерно в 60 поколениях позволяет восстанавливать до 97 % разрядов ключа длиной в 256 бит [22, 23]. В каждом следующем поколении собственная эн-

тропия размножаемых образов «Чужой» снижается, что приближает их к образу «Свой», который обладает нулевой энтропией.

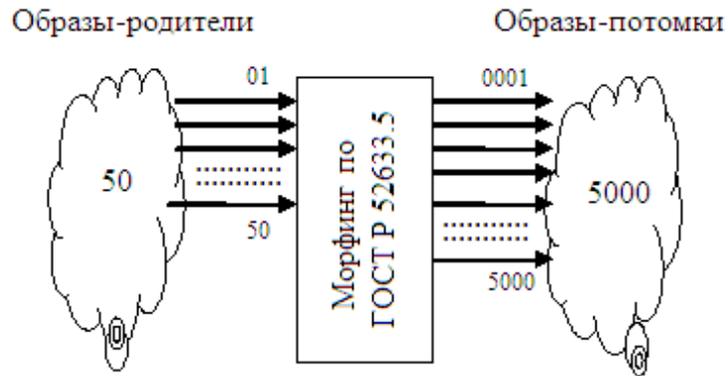


Рис. 5. Операция морфинг-размножения 50 биометрических образов-родителей в 5000 образов-потомков

При направленном движении выбираемых низкоэнтропийных образов «Чужой» в сторону образа «Свой» скорость движения с каждым следующим поколением снижается. Увеличить скорость удается, если при размножении образов добавлять малые случайные мутации по схеме, приведенной на рис. 6. Формально каждая мутация дает новый образ «Чужой».

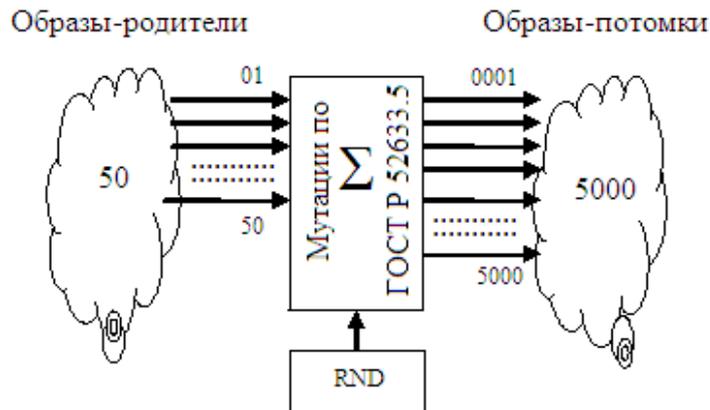


Рис. 6. Добавление малого случайного шума мутаций к образам «Чужой» по ГОСТ Р 52633.2–2010

В случае нейросетевого анализа малых выборок, например состоящих из 16 опытов, ошибка принятия решений одним нейроном (5) оказывается значительной. При использовании нескольких нейронов [13] ошибка снижается медленно. Повысить достоверность принимаемых решений в сотни раз удастся в том случае, когда из исходной выборки получают большое число выборок меньшего размера. Например, если из 16 опытов случайно выбирать 5 опытов, то получим достаточно большое число выборок по 11 опытов:

$$C_{16}^{11} = \frac{16!}{11! \cdot (16-11)!} = 4368. \quad (6)$$

Случайные перестановки опытов и прореживание выборки можно рассматривать как еще один способ размножения данных. На рис. 7 приведена схема, воспроизводящая множество малых выборок из одной исходной выборки.

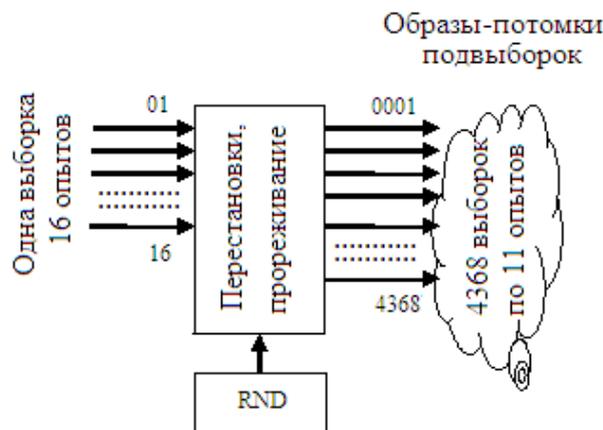


Рис. 7. Получение множества выборок случайной перестановкой опытов и их прореживанием

Использование сетей искусственных нейронов с большим числом выходов при анализе малых выборок приводит к появлению спектра амплитуд вероятностей тех или иных выходных кодовых состояний. Анализ спектра амплитуд вероятности нельзя выполнить по одной выборке. Размножение данных одной выборки позволяет получить множество выборок через их использование и увидеть линии спектра выходных состояний.

### Заключение

Активное развитие биометрии привело к появлению порядка 160 международных стандартов ISO/IEC JTC1 sc37 (Биометрия) с 2002 г. по настоящее время. Ни одного международного стандарта по нейросетевой биометрии нет и не находится в разработке. Международный технический комитет ISO/IEC JTC1 sc42 (Искусственный интеллект) также не занимается приложениями нейронных сетей в биометрии. Единственный пакет стандартов по нейросетевой биометрии создала для себя Россия, фактически закрывая пробелы в системе международных стандартов.

В августе 2019 г. в России создан технический комитет 164 (Искусственный интеллект), чуть позже (10.10.2019) вышел указ В. В. Путина «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». Предположительно, эти два события приведут к росту внимания к развитию нейросетевых технологий не только для решения задач биометрии. Видимо, уже созданные отечественные стандарты нейросетевой биометрии могут быть фундаментом для иных важных практических приложений. Авторы данной статьи уверены, что поднятые в нашей работе вопросы о графических отображениях нейросетевых решающих правил своевременны. Наши предложения построены на опыте применения искусственных нейронных сетей в биометрии, надеемся что данный опыт удастся перенести и на иные нейросетевые приложения искусственного интеллекта.

**Библиографический список**

1. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – Москва : Вильямс, 2006. – С. 1104.
2. **Рассел, С.** Искусственный интеллект. Современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. – Москва ; Санк-Перербург ; Киев, 2006 – 1407 с.
3. **Николенко, С.** Глубокое обучение / С. Николенко, А. Кадурын, Е. Архангельская. – Санкт-Перербург : Питерб, 2018. – 480 с.
4. ГОСТ Р 52633.0–2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации. – Москва, 2006.
5. ГОСТ Р 52633.1–2009. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию баз естественных биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. – Москва, 2009.
6. ГОСТ Р 52633.2–2010. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. – Москва, 2010.
7. ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора. – Москва, 2011.
8. ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. – Москва, 2011.
9. Защита нейросетевых биометрических контейнеров с использованием криптографических алгоритмов» [проект технической спецификации «Криптографическая защита информации] Публичное обсуждение документа проходит в ТК 26 с 2017 г., в 2020 г. ожидается голосование по проекту технической спецификации.
10. **Волчихин, В. И.** Фрактально-корреляционный функционал, используемый при поиске пар слабо зависимых биометрических данных в малых выборках / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Б. Б. Ахметов, Ю. И. Серикова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 25–31.
11. **Волчихин, В. И.** Обучение сетей квадратичных форм на малых выборках биометрических данных с использованием процедуры симметризации корреляционных связей / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Е. А. Малыгина, Ю. И. Серикова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 66–74.
12. **Иванов, А. И.** Защита искусственного интеллекта: ортогонализация статистико-нейросетевого анализа малых выборок биометрических данных : препринт / А. И. Иванов, Е. Н. Куприянов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 72 с.
13. **Иванов, А. И.** Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке MathCAD) : препринт / А. И. Иванов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 36 с.
14. **Малыгина, Е. А.** Биометрико-нейросетевая аутентификация: перспективы применения сетей квадратичных нейронов с многоуровневым квантованием биометрических данных : препринт / Е. А. Малыгина. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 114 с.
15. **Волчихин, В. И.** Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, Е. А. Малыгина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 88–99.

16. **Волчихин, В. И.** Соотношение мощности нейронов с линейным и квадратичным обогатителями биометрических данных / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Е. А. Малыгина, А. П. Юнин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 1 (45). – С. 17–25.
17. **Волчихин, В. И.** Сопоставление мощности двух типов искусственных нейронов, осуществляющих обогащение биометрических данных в линейном и квадратичном пространствах / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Е. А. Малыгина, Ю. И. Серикова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 3 (47). – С. 47–57.
18. **Волчихин, В. И.** Особенности обучения сетей вероятностных нейронов «Крамера-фон Мизеса» на малых биометрических выборках / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, С. Е. Вятчанин // Новые информационные технологии и системы : сб. науч. ст. XIV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 22–24 ноября 2017 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – С. 159–163.
19. **Волчихин, В. И.** Абсолютно устойчивый алгоритм автоматического обучения сетей вероятностных нейронов «Крамера – фон Мизеса» на малых выборках биометрических данных / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, С. Е. Вятчанин, Е. А. Малыгина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 55–65.
20. **Иванов, А. И.** Второй национальный стандарт России по быстрому автоматическому обучению больших искусственных нейронных сетей на малых выборках биометрических данных / А. И. Иванов, А. В. Безяев, Е. А. Малыгина, Ю. И. Серикова // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам I Всеросс. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 24 апреля 2019 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 174–177.
21. Стандарт ТК 362. Защита информации. ТЕХНИКА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ. Автоматическое обучение сетей квадратичных нейронов с многоуровневым квантованием биометрических данных [проект]. Работы начаты с 01.07.2018 и велись специалистами 5 предприятий (Воронеж, Пенза, Москва). 01.02.2019 материалы направлены в ТК 362. В настоящее время ведется подготовка к началу публичного обсуждения проекта нового стандарта.
22. **Волчихин, В. И.** Нейросетевая молекула: решение обратной задачи биометрии через программную поддержку квантовой суперпозиции на выходах сети искусственных нейронов / В. И. Волчихин, А. И. Иванов // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 4. – С. 518–523.
23. Нейросетевая защита персональных биометрических данных / Ю. К. Язов, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, И. Г. Назаров. – Москва : Радиотехника, 2012. – 157 с.

### References

1. Khaykin S. *Neuronnye seti: polnyy kurs* [Neural networks: complete course]. Moscow: Vil'yams, 2006, p. 1104. [In Russian]
2. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod* [Artificial Intelligence. Modern approach]. Moscow; Saint-Petersburg; Kiev, 2006, 1407 p. [In Russian]
3. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie* [In-depth study]. Saint-Petersburg: Piterb, 2018, 480 p. [In Russian]
4. GOST R 52633.0–2006. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Trebovaniya k sredstvam vysokonadezhnoy biometricheskoy autentifikatsii* [Data protection. Information security technology. Requirements for highly secure biometric authentication tools]. Moscow, 2006. [In Russian]
5. GOST R 52633.1–2009. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Trebovaniya k formirovaniyu baz estestvennykh biometricheskikh obrazov, prednazna-*

- chennykh dlya testirovaniya sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy autentifikatsii* [Data protection. Information security technology. Requirements for the formation of databases of natural biometric images intended for testing highly reliable biometric authentication facilities]. Moscow, 2009. [In Russian]
6. GOST R 52633.2–2010. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Trebovaniya k formirovaniyu sinteticheskikh biometricheskikh obrazov, prednaznachennykh dlya testirovaniya sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy autentifikatsii* [Data protection. Information security technology. Requirements for the formation of synthetic biometric images intended for testing a highly reliable biometric authentication facility]. Moscow, 2010. [In Russian]
  7. GOST R 52633.3–2011. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Testirovanie stoykosti sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy zashchity k atakam podbora* [Data protection. Information security technology. Testing the resistance of highly reliable biometric security to brute force attacks]. Moscow, 2011.
  8. GOST R 52633.5–2011. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Avtomaticheskoe obuchenie neyrosetevykh preobrazovateley biometriya-kod dostupa* [Data protection. Information security technology. Automatic training of neural network converters biometrics-access code]. Moscow, 2011. [In Russian]
  9. *Zashchita neyrosetevykh biometricheskikh konteynerov s ispol'zovaniem kriptograficheskikh algoritmov» [proekt tekhnicheskoy spetsifikatsii «Kriptograficheskaya zashchita informatsii] Publichnoe obsuzhdenie dokumenta prokhodit v TK 26 s 2017 g., v 2020 g. ozhidaetsya golosovanie po projektu tekhnicheskoy spetsifikatsii* [Protection of neural network biometric containers using cryptographic algorithms [draft technical specification “Cryptographic protection of information”]. Public discussion of the document has been taking place in TC 26 since 2017; a vote on the draft technical specification is expected in 2020]. [In Russian]
  10. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Akhmetov B. B., Serikova Yu. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 4, pp. 25–31. [In Russian]
  11. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Malygina E. A., Serikova Yu. I. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Operation. Control]. 2018, no. 1 (23), pp. 66–74. [In Russian]
  12. Ivanov A. I., Kupriyanov E. N. *Zashchita iskusstvennogo intellekta: ortogonalizatsiya statistiko-neyrosetevogo analiza malykh vyborok biometricheskikh dannykh: preprint* [Artificial intelligence protection: orthogonalization of statistic neural network analysis of small samples of biometric data: preprint]. Penza: Izd-vo PGU, 2020, 72 p. [In Russian]
  13. Ivanov A. I. *Iskusstvennye matematicheskie molekuly: povyshenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke MathCAD): prepreprint* [Artificial mathematical molecules: improving the accuracy of statistical estimates on small samples (programs in the MathCAD language): preprint]. Penza: Izd-vo PGU, 2020, 36 p. [In Russian]
  14. Malygina E. A. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: perspektivy primeneniya setey kvadratichnykh neyronov s mnogourovnevnyim kvantovaniem biometricheskikh dannykh: preprint* [Biometrical-neural network authentication - prospects for the use of networks of square neurons with multilevel quantization of biometric data: preprint]. Penza: Izd-vo PGU, 2020, 114 p. [In Russian]
  15. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Malygina E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 4 (28), pp. 88–99. [In Russian]
  16. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Malygina E. A., Yunin A. P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2018, no. 1 (45), pp. 17–25. [In Russian]

17. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Malygina E. A., Serikova Yu. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2018, no. 3 (47), pp. 47–57. [In Russian]
18. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Vyatchanin S. E. *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy: sb. nauch. st. XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 22–24 noyabrya 2017 g.)* [New information technologies and systems: proceedings of the 14<sup>th</sup> International scientific and engineering conference (Penza, 22-24 of November 2017)]. Penza: Izd-vo PGU, 2017, pp. 159–163. [In Russian]
19. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Vyatchanin S. E., Malygina E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 2 (42), pp. 55–65. [In Russian]
20. Ivanov A. I., Bezyaev A. V., Malygina E. A., Serikova Yu. I. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam I Vseross. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 24 aprelya 2019 g.)* [Information technology security: proceedings of the 1<sup>st</sup> All-Russian scientific and engineering conference (Penza, April 24, 2019)]. Penza: Izd-vo PGU, 2019, pp. 174–177. [In Russian]
21. *Standart TK 362. Zashchita informatsii. TEKNIKA ZAShchITY INFORMATsII. Avtomaticheskoe obuchenie setey kvadrnichnykh neyronov s mnogourovnevnyy kvantovaniem biometricheskikh dannykh [proekt]. Raboty nachaty s 01.07.2018 i velis' spetsialistami 5 predpriyatiy (Voronezh, Penza, Moskva). 01.02.2019 materialy napravleny v TK 362. V nastoyashchee vremya vedetsya podgotovka k nachalu publichnogo obshchdeniya proekta novogo standarta* [TC 362 standard. Information protection. Information security technology. Automatic training of networks of quadratic neurons with multilevel quantization of biometric data (project). The work began on July 1, 2018 and was carried out by specialists from five enterprises (Voronezh, Penza and Moscow). On February 1, 2019, materials were sent to TC 362. Currently, preparations are underway for the start of a public discussion of the draft new standard]. [In Russian]
22. Volchikhin V. I., Ivanov A. I. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Bulletin of Mordovia University]. 2017, vol. 27, no. 4, pp. 518–523. [In Russian]
23. Yazov Yu. K., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Nazarov I. G. *Neurosetevaya zashchita personal'nykh biometricheskikh dannykh* [Neural network protection of personal biometric data]. Moscow: Radiotekhnika, 2012, 157 p. [In Russian]

---

**Иванов Александр Иванович**

доктор технических наук, доцент,  
консультант, Пензенский научно-  
исследовательский электротехнический  
институт (Россия, г. Пенза,  
ул. Советская, 9)

E-mail: bio.ivan.penza@mail.ru

**Ivanov Aleksandr Ivanovich**

Doctor of engineering sciences, associate  
professor, consultant, Penza Research  
Institute of Electrical Engineering  
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

**Малыгина Елена Александровна**

кандидат технических наук, докторант  
кафедры технических средств  
информационной безопасности,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: mal890@yandex.ru

**Malygina Elena Aleksandrovna**

Candidate of engineering sciences,  
doctor's degree student of the sub-  
department of information security  
technology, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Лукин Виталий Сергеевич**

младший научный сотрудник,  
Региональный учебно-научный центр  
«Информационная безопасность»,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [ibst@pnzgu.ru](mailto:ibst@pnzgu.ru)

**Lukin Vitaliy Sergeevich**

Junior researcher, Regional Training  
and Research Center of «Information  
security», Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Иванов, А. И. Компактная графическо-иероглифная система отображения схем многообразных нейросетевых вычислений / А. И. Иванов, Е. А. Малыгина, В. С. Лукин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 5–18. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-1.

В. С. Лукин

## СРАВНЕНИЕ МОЩНОСТИ ОБЫЧНОЙ И ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ ФОРМ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ СРЕДНЕГО ГАРМОНИЧЕСКОГО ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ НОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАНЫХ МАЛОЙ ВЫБОРКИ<sup>1</sup>

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Целью статьи является сравнение вероятностей ошибок первого рода для статистического хи-квадрат критерия и двух новых статистических критериев среднего гармонического в нормальной и логарифмической формах.

*Материалы и методы.* Предложено при принятии решения использовать три статистических критерия. Проблему разных шкал трех разных критериев предложено решать заменой каждого критерия эквивалентным ему нейроном с бинарным квантователем. Настройка квантователей выполняется так, чтобы давать равные вероятности ошибок первого и второго рода.

*Выводы.* Показано, что рассматриваемая группа искусственных нейронов имеет значительные перспективы практического применения, так как обладает крайне низкой корреляционной сцепленностью.

**Ключевые слова:** искусственные нейроны, статистические критерии, проверка гипотезы нормальности, малые выборки.

V. S. Lukin

## COMPARISON OF THE GENERAL LOGARITHMIC FORMS' POWER OF STATISTICAL CRITERIA OF THE HARMONIC MEAN USING THE HYPOTHESIS OF NORMAL DISTRIBUTION OF SMALL SAMPLE DATA<sup>2</sup>

### Abstract.

*Background.* The purpose of the article is to compare the probabilities of type I errors for the statistical chi-square test and two new statistical tests with the harmonic mean in normal and logarithmic forms.

*Materials and methods.* It is proposed to use three statistical criteria when making a decision. It is proposed to solve the problem of different scales of three different criteria by replacing each criterion with an equivalent neuron with a binary quantifier. The quantizers are tuned to give equal probabilities of type I and II errors.

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ, проект № 19).

<sup>2</sup> Acknowledgments: The reported study was funded by Russian Ministry of Science (information security, project 19).

© Лукин В. С., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

*Conclusions.* It is shown that the considered group of artificial neurons has significant prospects for practical application, since it has an extremely low correlation coupling.

**Keywords:** artificial neurons, statistical criteria, testing the normality hypothesis, small samples.

### Общие положения статистического анализа малых выборок

Одной из серьезных задач современной статистики является корректная обработка малых выборок с приемлемым для практики уровнем доверия к решению. В биометрии, биологии, медицине, статистике актуальные на текущий момент выборки малы. Так, обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код по ГОСТ Р 52633.5 выполняется на 20 примерах образа «Свой». При этом малая выборка одного из биометрических параметров должна иметь нормальное распределение, обнаружение равномерного распределения данных малой выборки в 20 опытов соответствует обнаружению попытки атаки на процедуру обучения.

Очевидно, что для проверки гипотезы нормальности мы можем воспользоваться классическим хи-квадрат критерием [1, 2]. Результат моделирования работы хи-квадрат критерия на выборке в 16 опытов иллюстрирует рис. 1.

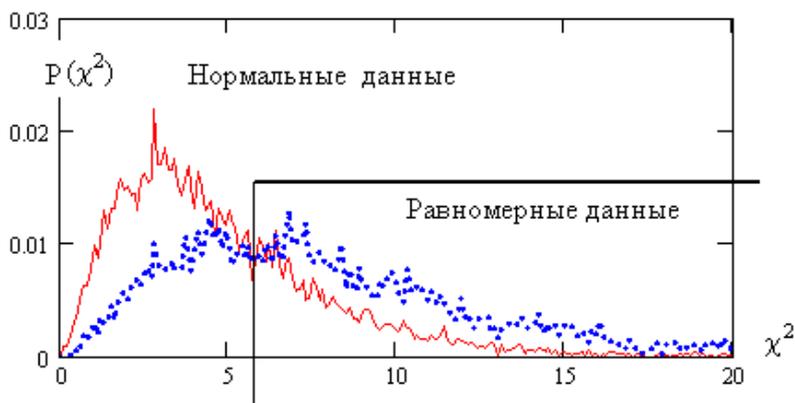


Рис. 1. Выходные состояния хи-квадрат критерия при воздействии на него нормально распределенными и равномерно распределенными данными

Очевидно, что для моделирования работы хи-квадрат критерия может быть использован соответствующий искусственный нейрон [3, 4], для этой цели на выход сумматора хи-квадрат критерия следует поставить бинарный квантователь, который дает состояние «0» при обнаружении нормального распределения данных. Важным элементом обучения искусственного нейрона является настройка порога срабатывания квантователя. Целесообразно выполнять настройку порога квантователя, исходя из условий симметризации задачи [5–7] нейросетевой обработки данных. Одним из условий полной симметризации является совпадение вероятностей ошибок первого и второго рода при работе искусственного нейрона. В нашем случае (рис. 1) положение порога квантования обеспечивает совпадение вероятностей  $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx$

$\approx 0,342$ . Последнее означает, что практически каждое третье решение искусственного нейрона будет являться ошибочным. Мы имеем ситуацию недопустимо высокого уровня ошибок, фактически исключающую применение хи-квадрат критерия для анализа малых выборок. В соответствии со стандартными рекомендациями [1] хи-квадрат нейрон дает приемлемый для практики результат только на выборках в 60 и более опытов.

К сожалению, все созданные в XX в. статистические критерии [2] «плохо» работают на малых выборках. Тем не менее технически возможно создать из 21 наиболее мощного статистического критерия [2, с. 278] эквивалентные им искусственные нейроны, получив тем самым нейросетевые обобщения статистических критериев прошлого века. Очевидно, что обнаружение на выходе такой нейронной сети кода, состоящего из 21 разряда с состояниями «0», будет соответствовать обнаружению с очень высокой достоверностью нормального распределения данных малой выборки. Обнаружение кода из 21 разряда с одинаковыми состояниями «1» будет соответствовать обнаружению с очень высокой достоверностью равномерного распределения данных малой выборки. Все промежуточные коды со смешанными состояниями разрядов «0» и «1» необходимо свертывать до однозначного решения. К сожалению, проблема синтеза эффективных кодов свертывания данных [8] плохо решается для разрядов с высокой корреляционной сцепленностью. Если любые два разряда кода имеют сильную корреляционную связь (положительную или отрицательную), их можно объединить полностью детерминированным дискретным автоматом. Если же модуль корреляционной связи двух разрядов достаточно мал, то они хорошо дополняют друг друга.

Так, нейрон хи-квадрат критерия и нейрон критерия Шапиро – Уилка [9, 10] имеют высокое значение модуля коэффициента взаимной корреляции  $|\text{corr}(\chi^2, v^2)| \approx |-0,726|$  при сопоставимых значениях вероятностей ошибок первого и второго рода. Данные со столь значительной корреляционной сцепленностью сильно повторяют друг друга. Для принятия приемлемого по достоверности нейросетевого решения на таких данных потребуются использовать порядка 100 статистических критериев (нейронов). Всего же, по данным справочника [2], в XX в. было создано не многим более 21 статистического критерия для проверки гипотезы нормальности. Таким образом, группу из 21 сильно коррелированного критерия прошлого века в XXI в., в худшем случае, придется расширить 79 новыми статистическими критериями. Если же постараться синтезировать новые статистические критерии с низкой корреляцией по отношению к хи-квадрат критерию, то новых критериев потребуется создавать намного меньше.

### **Искусственные нейроны среднего гармонического**

Все искусственные нейроны обогащают относительно бедные входные данные, накапливая их в линейном либо некотором нелинейном пространстве. Так, перцептроны Розенблатта [3, 4] накапливают данные в линейном пространстве, а уже после их обогащения выполняют квантование данных. Нейроны Махаланобиса выполняют обогащение входных данных в квадратичном пространстве, взвешивая их обратной матрицей ковариационных связей. Хи-квадрат нейроны (рис. 1) выполняют обогащение данных в пространстве среднего квадратического отклонения Пирсона. То есть нейронов может

существовать несчетное множество (континуум), так же как существует континуум возможных вариантов нелинейной деформации непрерывных пространств накопления данных.

В этом отношении определенный интерес представляют деформации пространства накопления данных, не исследованных в прошлом веке при синтезе критериев проверки гипотезы нормальности [2]. Например, рассмотрим пространство накопления данных среднего гармонического [10, 11]. Нейрон, выполняющий накопление данных в таком пространстве, описывается следующими функциональными связями:

$$\left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(x), \\ \tilde{x}_i \leftarrow \frac{x_i - x_0}{\sigma(x)} + 1, \\ g \leftarrow \frac{16 \sqrt{\prod_{i=1}^{15} \tilde{x}_i}}{E(\tilde{x})}, \\ z(g) \leftarrow "0" \text{ if } g \geq 0,913, \\ z(g) \leftarrow "1" \text{ if } g < 0,913, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $x_i$  – данные анализируемой выборки объемом в 16 опытов;  $\sigma(\cdot)$  – операция вычисления стандартного отклонения;  $E(\cdot)$  – операция вычисления математического ожидания;  $z(\cdot)$  – операция квантования обогащенных накоплением данных.

Результаты численного моделирования нейрона среднего гармонического (1) отражает рис. 2.

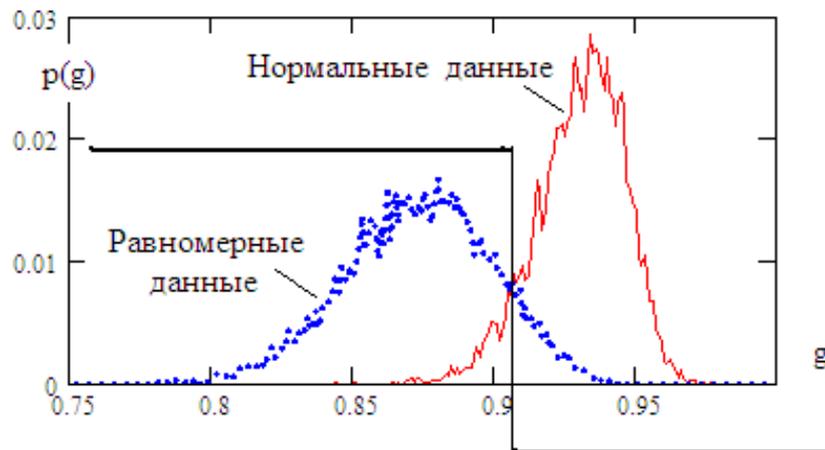


Рис. 2. Выходные состояния искусственного нейрона, построенного на вычислении среднего геометрического малой выборки в 16 опытов

Из сравнения рис. 1 и 2 вытекает значительный рост мощности нового статистического критерия, так как его вероятности ошибок значительно уменьшаются до величины  $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,088$ . Столь существенное падение вероятностей ошибок эквивалентно почти четырехкратному росту мощности

нового критерия по отношению к хи-квадрат критерию  $0,342/0,088 \approx 3,9$ . Принципиально важным является также то, что эти два критерия имеют низкую корреляционную связь на нормальных данных  $|\text{corr}(\chi^2, g)| \approx |0,0015|$ .

### Логарифмическая форма критерия среднего гармонического

Очевидно, что многократное произведение обрабатываемых данных (1) может быть заменено суммой логарифмов. То есть мы, так же как и для статистических критериев Андерсона – Дарлинга [2, 10, 12], имеем возможность получить две формы представления нового статистического критерия. Логарифмическая форма критерия среднего гармонического имеет следующую функциональную запись:

$$\left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(x), \\ \tilde{x}_i \leftarrow \frac{x_i - x_0}{\sigma(x)} + 1, \\ \sum_{i=1}^{15} \ln(\tilde{x}_i) \\ \ln g \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^{15} \ln(\tilde{x}_i)}{16 \cdot \ln(E(\tilde{x}))}, \\ z(\ln g) \leftarrow "0" \text{ if } \ln g \geq 0,911, \\ z(\ln g) \leftarrow "1" \text{ if } \ln g < 0,911. \end{array} \right. \quad (2)$$

Сравнивая рис. 2 и 3, легко заметить рост вероятности ошибок третьего нейрона по сравнению со вторым нейроном до величины  $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,244$ . То есть мощность логарифмической формы критерия среднего гармонического выше мощности хи-квадрат критерия, но уступает мощности критерия, вычисленного через последовательные умножения (1). Принципиально важным является то, что все три рассмотренные выше статистические критерия имеют низкие значения корреляционной сцепленности [13]. Данные о коэффициентах взаимной корреляции приведены в табл. 1.

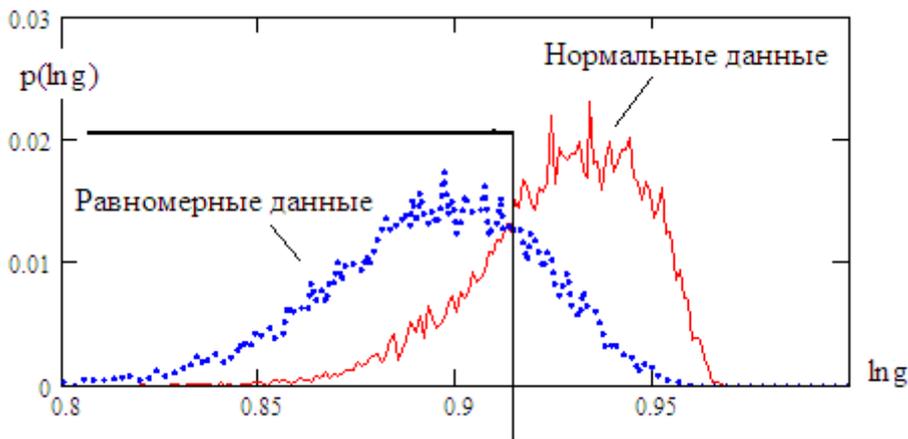


Рис. 3. Искусственный нейрон, воспроизводящий логарифмическую форму критерия среднего гармонического для малой выборки в 16 опытов

Коэффициенты корреляции для трех статистических критериев (нейронов)

Коэффициенты корреляции для нормальных данных	Коэффициенты корреляции для равномерно распределенных данных
$\text{corr}(\chi^2, g) \approx 0,0015$	$\text{corr}(\chi^2, g) \approx -0,0011$
$\text{corr}(\chi^2, \text{lng}) \approx 0,013$	$\text{corr}(\chi^2, \text{lng}) \approx -0,0029$
$\text{corr}(g, \text{lng}) \approx 0,0085$	$\text{corr}(g, \text{lng}) \approx 0,0040$

**Примечание.**  $\chi^2$  – хи-квадрат переменная Пирсона;  $g$  – среднее гармоническое;  $\text{lng}$  – логарифмическая форма среднего гармонического.

### Заключение

Из табл. 1 видно, что по сравнению с коэффициентом корреляции пары хи-квадрат критерия и критерия Шапиро – Уилка пары новых статистических критериев имеют модули коэффициентов корреляции в 70 и более раз ниже. То есть задача синтеза достаточно большой группы новых и старых статистических критериев с низкой корреляционной сцепленностью вполне реальна. Если в XX в. статистики создавали одиночные критерии, стремясь увеличить их мощность, то в XXI в., видимо, придется создавать группы статистических критериев одновременно имеющих приемлемую мощность и приемлемое значение модулей корреляционной сцепленности. В ближайшем будущем ожидается создание групп из 9 и более статистических критериев, обладающих низкой корреляционной сцепленностью и приемлемой мощностью для многокритериальной оценки достоверности гипотезы нормального распределения данных малых выборок.

### Библиографический список

1. Р 50.1.037–2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа  $\chi^2$ . Госстандарт России. – Москва, 2001. – 140 с.
2. **Кобзарь, А. И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – Москва : Физматлит, 2006. – 816 с.
3. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – Москва : Вильямс, 2006. – С. 1104.
4. **Рассел, С.** Искусственный интеллект. Современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. – Москва ; Санкт-Петербург ; Киев, 2006. – 1407 с.
5. **Иванов, А. И.** Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке MathCAD) : препринт / А. И. Иванов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 36 с.
6. **Иванов, А. И.** Учет влияния корреляционных связей через их усреднение по модулю при нейросетевом обобщении статистических критериев для малых выборок / А. И. Иванов, А. Г. Банных, Ю. И. Серикова // Надежность. – 2020. – № 20 (2). – С. 28–34. – DOI 10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34.
7. **Иванов, А. И.** Искусственные молекулы, собранные из искусственных нейронов, воспроизводящих работу классических статистических критериев / А. И. Иванов, А. Г. Банных, А. В. Безяев // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2020 – № 1 (48). – С. 26–32.
8. **Безяев, А. В.** Биометрико-нейросетевая аутентификация: обнаружение и исправление ошибок в длинных кодах без накладных расходов на избыточность : препринт / А. В. Безяев. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – 40 с.

9. **Иванов, А. И.** Прецизионная статистика: нейросетевое объединение хи-квадрат критерия и критерия Шапиро – Уилка при анализе малых выборок биометрических данных / А. И. Иванов, С. Е. Вятчанин, Е. А. Малыгина, В. С. Лукин // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 2. – С. 131–134.
10. Коллекция искусственных нейронов эквивалентных статистическим критериям для их совместного применения при проверке гипотезы нормальности малых выборок биометрических данных / А. И. Иванов, А. Г. Банных, Е. Н. Куприянов, В. С. Лукин, К. А. Перфилов, К. Н. Савинов // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам I Всеросс. науч.-техн. конф. (г. Пенза 24 апреля 2019 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 156–164.
11. **Иванов, А. И.** Нейросетевое обобщение семейства статистических критериев среднего геометрического и среднего гармонического для прецизионного анализа малых выборок биометрических данных / А. И. Иванов, К. А. Перфилов, В. С. Лукин // Информационно-управляющие телекоммуникационные системы, средства поражения и их техническое обеспечение : сб. науч. ст. Всеросс. науч.-техн. конф. / под общ. ред. В. С. Безяева. – Пенза : АО «НПП Рубин», 2019. – С. 50–63.
12. **Волчихин, В. И.** Нейросетевой анализ малых выборок биометрических данных с использованием хи-квадрат критерия и критериев Андерсона-Дарлингга / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. В. Безяев, Е. Н. Куприянов // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 205–217. – DOI 10.15507/2658-4123.029/2019.02.205-217.
13. **Иванов, А. И.** Численная оценка показателей квантовой сцепленности выходных кубит нейросетевой молекулы преобразователя биометрических данных : учебное пособие / А. И. Иванов. – Пенза : Изд-во АО «ПНИЭИ», 2018. – 27 с. – URL : <http://пниэи.рф/activity/science/noc/BOOK18-2.pdf>

### References

1. R 50.1.037–2002. *Rekomendatsii po standartizatsii. Prikladnaya statistika. Pravila proverki soglasiya opytnogo raspredeleniya s teoreticheskim. Chast' I. Kriterii tipa  $\chi^2$ . Gosstandart Rossii* [Recommendations for standardization. Applied statistics. Rules for checking the agreement of the experimental distribution with the theoretical one. Part 1/ Type  $\chi^2$  criteria]. Moscow, 2001, 140 p. [In Russian]
2. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 816 p. [In Russian]
3. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs* [Neural networks: complete course]. Moscow: Vil'yams, 2006, p. 1104. [In Russian]
4. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod* [Artificial Intelligence. Modern approach]. Moscow; Saint-Petersburg; Kiev, 2006, 1407 p. [In Russian]
5. Ivanov A. I. *Iskusstvennyye matematicheskie molekuly: povyshenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke MathCAD): preprint* [Artificial mathematical molecules: increasing the accuracy of statistical estimates on small samples (programs in the MathCAD language): preprint]. Penza: Izd-vo PGU, 2020, 36 p. [In Russian]
6. Ivanov A. I., Bannykh A. G., Serikova Yu. I. *Nadezhnost'* [Safety]. 2020, no. 20 (2), pp. 28–34. DOI 10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34. [In Russian]
7. Ivanov A. I., Bannykh A. G., Bezyaev A. V. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Bulletin of Perm University. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics]. 2020, no. 1 (48), pp. 26–32. [In Russian]
8. Bezyaev A. V. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: obnaruzhenie i ispravlenie oshibok v dlinnykh kodakh bez nakladnykh raskhodov na izbytochnost': preprint* [Biometrical neural network authentication: detecting and correcting errors in long codes]

- without the overhead of redundancy: preprint]. Penza: Izd-vo PGU, 2020, 40 p. [In Russian]
9. Ivanov A. I., Vyatchanin S. E., Malygina E. A., Lukin V. S. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium "Safety and quality"]. 2019, vol. 2, pp. 131–134. [In Russian]
  10. Ivanov A. I., Bannykh A. G., Kupriyanov E. N., Lukin V. S., Perfilov K. A., Savinov K. N. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam I Vseross. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza 24 aprelya 2019 g.)* [Information technology security: proceedings of the 1<sup>st</sup> All-Russian scientific and engineering conference (Penza, April 24, 2019)]. Penza: Izd-vo PGU, 2019, pp. 156–164. [In Russian]
  11. Ivanov A. I., Perfilov K. A., Lukin V. S. *Informatsionno-upravlyayushchie telekommunikatsionnye sistemy, sredstva porazheniya i ikh tekhnicheskoe obespechenie: sb. nauch. st. Vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Information and control telecommunication systems, weapons and their technical support: proceedings of the All-Russian scientific and engineering conference]. Penza: AO «NPP Rubin», 2019, pp. 50–63. [In Russian]
  12. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Bezyaev A. V., Kupriyanov E. N. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy* [Engineering technologies and systems]. 2019, vol. 29, no. 2, pp. 205–217. DOI 10.15507/2658-4123.029/2019.02.205-217. [In Russian]
  13. Ivanov A. I. *Chislennaya otsenka pokazateley kvantovoy stseplennosti vykhodnykh kubit neyrosetevoy molekuly preobrazovatelya biometricheskikh dannykh: uchebnoe posobie* [Numerical estimation of the parameters of quantum entanglement of the output qubits of the neural network molecule of the biometric data converter: a teaching aid]. Penza: Izd-vo AO «PNIEI», 2018, 27 p. Available at: <http://pniei.pf/activity/science/noc/BOOK18-2.pdf> [In Russian]
- 

***Лукин Виталий Сергеевич***

младший научный сотрудник,  
Региональный учебно-научный центр  
«Информационная безопасность»,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [ibst@pnzgu.ru](mailto:ibst@pnzgu.ru)

---

***Lukin Vitaliy Sergeevich***

Junior researcher, Regional Training  
and Research Center of «Information  
security», Penza State University  
(40 Krasnaya, Penza, Russia)

**Образец цитирования:**

Лукин, В. С. Сравнение мощности обычной и логарифмической форм статистических критериев среднего гармонического при использовании для проверки гипотезы нормального распределения данных малой выборки / В. С. Лукин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 19–26. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-2.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕДАЧИ МУЛЬТИМЕДИЙНОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СРЕДЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ<sup>1</sup>

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются технология и системы виртуальной реальности, представляющие собой комплексные решения погружения пользователя в иммерсивный виртуальный мир при использовании специализированных устройств и средств сопряжения. Предметом исследования являются технологии проводной/беспроводной передачи аудиовизуальной и параметрической информации в системах виртуальной реальности. Цель работы – провести анализ и обобщить достоинства и недостатки современных средств передачи мультимедийной и параметрической информации, используемых в системах виртуальной реальности.

*Материалы и методы.* В качестве материалов исследования использовался поисковый метод научных публикаций в российских и международных журналах баз данных научного цитирования.

*Результаты.* В работе проведен анализ особенностей (достоинств и недостатков) применения виртуальной реальности в условиях оптической передачи информации, беспроводных протоколов (WiFi, Bluetooth, Wireless USB, LIDAR, ZBee) и проводных интерфейсов (DisplayPort, HDMI, USB), обеспечивающих коммуникацию пользователя с системой виртуальной реальности. Виртуальная реальность формирует новый искусственно-реальный мир, передаваемый пользователю через различные проводные/беспроводные (WiGig (802.11ad), WiFi 6 (802.11ax), WiHD (802.15.3c) и DisplayPort 2.0) средства сопряжения с учетом физиологических, физических и психометрических показателей.

*Выводы.* Современные технические решения должны дать толчок для создания адаптивной виртуальной реальности с полным эффектом погружения, когда пользователь не сможет отличить виртуальный мир от реальных событий.

**Ключевые слова:** беспроводная/проводная передача информации, тактильные средства сопряжения, адаптивная виртуальная реальность.

*A. Yu. Tychkov, A. V. Grachev, A. K. Alimuradov, P. P. Churakov*

## A RESEARCH OF THE FEATURES OF MULTIMEDIA AND PARAMETRITIC INFORMATION TRANSMISSION IN THE VIRTUAL REALITY SYSTEMS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Авторы благодарят Российский научный фонд за финансовую поддержку проекта «Поиск скрытых паттернов пограничных психических расстройств и разработка системы экспресс-оценки состояния психического здоровья человека», № 17-71-20029.

<sup>2</sup> The authors thank the Russian Science Foundation for financial support for the project implementation “Search for hidden patterns of borderline mental disorders and development of a system for rapid assessment of human mental health” No. 17-71-20029 to solve the tasks highlighted in this article.

© Тычков А. Ю., Грачев А. В., Алимуратов А. К., Чураков П. П., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

**Abstract.**

*Background.* The article is devoted to technologies and virtual reality systems as comprehensive solutions for immersion of the user into virtual reality using specialized devices and interfaces. Technologies for wire/wireless transfer of audio-visual and parametric information in virtual reality systems are discussed. The purpose of the article is to analyze and summarize advantages and disadvantages of modern facilities for multimedia and parametric information transmission used in virtual reality systems.

*Materials and methods.* The research materials used the search method of scientific publications in Russian and international journals of scientific citation databases.

*Results.* The paper analyzes the features (advantages and disadvantages) of using virtual reality in conditions of optical information transfer, wireless protocols (WiFi, Bluetooth, Wireless USB, LIDAR, ZigBee), and wire interfaces (Display Port, HDMI, USB) that provide user communication with virtual reality system. Virtual reality forms a new artificial real world transferred to the user via various wire/wireless (WiGig (802.11ad), WiFi 6 (802.11ax), WiHD (802.15.3c), and Display Port 2.0) interfaces, taking into account physiological, physical and psychometric indicators.

*Conclusions.* Modern technical solutions should give impetus to the creation of adaptive virtual reality with a total immersion effect, when the user cannot distinguish a virtual world from real events.

**Keywords:** wireless/wire information transmission, tactile interfaces, adaptive virtual reality.

## Введение

Развитие микропроцессорной техники, совершенствование способов и средств регистрации, обработки и передачи измерительной информации, а также разработки в области искусственного интеллекта и интерфейсов человек-машина привели к созданию нового поколения инструментов и механизмов восприятия реального мира через условно виртуальные события.

Виртуальная реальность (virtual reality, VR) – это технически конструируемая интерактивная среда, позволяющая пользователю погрузиться в иммерсивный мир и действовать в нем посредством специальных датчиков и программ. При этом зрительное, слуховое, осязательное, моторное и другие восприятия пользователем заменяются имитацией или симуляцией [1].

Еще в 1996 г. Rosen J. [2] четко сформулировал области развития аппаратной и программной базы VR в XXI в., отмечая наиболее перспективные области внедрения в образовательном процессе, моделировании различных объектов и текстур, а также в дистанционном управлении роботами-симуляторами в инженерных и медицинских приложениях.

Обобщенная структурная схема передачи информации в системах VR (рис. 1) состоит из:

- узлов построения моделей сцен VR (модели, сценарии и их позиционирование в среде);
- узлов передачи информации посредством физиологических средств сопряжения (зрение, слух и осязание);
- узлов приема информации посредством специальных датчиков положения тела пользователя;
- узлов контроля и состояния пользователя и параметрических датчиков в системе позиционирования посредством специализированных баз данных и знаний о физиологическом, физическом и психоэмоциональном состоянии пользователя.



Посредством адаптивного управления событиями виртуального мира (при условии быстродействия, беспроводности приема-передачи информации, высокой помехозащищенности, минимальных массе и размерах устройства, а также комплексности измерения информативных параметров состояния пользователя и узлов в условиях свободной двигательной активности) возможно создать биотехническую систему с биологической обратной связью на основе VR нового поколения.

Для создания виртуальных событий используется специальное программно-аппаратное обеспечение и источники изображений (сцены). Различают два основных аппаратных инструмента погружения в VR: очки и шлем с системой VR. Отличием является то, что в конструкции устройства очков VR отсутствуют встроенные дисплеи, поэтому для взаимодействия с пользователем необходим дополнительный экран или смартфон. Одним из достоинств данной системы является практически полная свобода передвижений. Шлемы VR полностью автономны и имеют встроенный дисплей, требующий подключения к стационарному компьютеру. Однако наиболее полное и реалистичное погружение пользователя достигается посредством систем VR, дополненных различными датчиками и узлами.

На данный момент можно выделить систему с рассредоточенными сенсорами (LIDARs) и компактные системы на основе камер для отслеживания положения пользователя в пространстве (WMR), интегрированных в шлем [3]. Первая система более громоздка и требует подключения нескольких LIDARs, размещаемых по периметру рабочей зоны для VR. Вторая более компактная, но не работает в условиях плохого освещения и требует периодической калибровки. Системы датчиков начального уровня, размещаемых на шлеме, способны отследить только повороты головы вверх-вниз, вправо-влево – 3 степени свободы (3 DoF), чего недостаточно, поэтому в современных VR используются системы продвинутого уровня 6 DoF, которые отслеживают еще и наклоны.

В разное время системы VR на рынке были представлены следующими компаниями-производителями: Epson BT-300, Oculus Rift S, HTC Vive, Microsoft HoloLens, Lumus dk-32, Samsung GearVR, Facebook, Sony, Nokia. Конструктивно известные системы VR включают в себя все необходимые узлы и элементы в одном монокорпусе. Основным компонентом системы VR является узел с двумя линзами и встроенным дисплеем. Как правило, системы VR оснащены одним экраном, который разделен на две части, каждая из которых показывает различные изображения для каждого глаза (стереоизображение). То есть каждый глаз видит только свою часть изображения, которая попеременно отображается с высокой частотой. Благодаря встроенным линзам изображение получает объем и правильную фокусировку взгляда на сцену и события виртуального мира [4, 5]. Кроме встроенных линз и экрана, система VR дополнительно оснащается датчиками и узлами, обеспечивающими привязку пользователя к системе координат виртуальной сцены, определение его положения и ориентацию в реальном пространстве.

### **Передача оптической информации в системах VR**

К основным оптическим характеристикам систем VR можно отнести разрешение дисплея (видимый размер пикселя экрана дисплея), угловое

разрешение, обеспечивающий окуляр, поле зрения (угловая часть пространства) [6].

Для формирования естественного восприятия изображения виртуального мира и создания сцен VR высокого качества необходимо воспроизведение видео высокой четкости с повышенной частотой смены кадра в секунду и увеличенной глубиной цветности, что в свою очередь накладывает ограничения на способы и инструменты передачи визуализируемой информации [6]. Важным фактором в формировании естественного восприятия сцен и изображений в VR является их качество, с которым оптическая система передает сигнал с дисплея на сетчатку глаза пользователя. Для фотореалистичности (например, для моделирования живых органов и биологических систем организма) используются дисплеи с высоким разрешением на каждый глаз.

Угловая часть пространства, которую в системе VR воспринимает приемник изображения (глаз пользователя) является полем зрения (Field of View, FV). Геометрически горизонтальный (измеряется в горизонтальной плоскости) и вертикальный (в вертикальной плоскости) угол обзора – это сектор с вершиной, находящейся между глазами пользователя. Максимальный горизонтальный угол обзора человека, как правило, составляет не более 220° [7]. В современных системах VR угол зрения в горизонтальной плоскости достигает 170–200°, что уже близко к максимальному восприятию. Немаловажными аспектами погружения в VR является вопрос аккомодации и конвергенции человеческого зрения, что решается постоянным трекингом зрачка.

Для формирования реалистичных изображений виртуального мира угловой размер пикселя экрана должен составлять меньше углового разрешения человеческого глаза и пользователь не должен видеть отдельных пикселей, составляющих изображение сцены. Следовательно, чтобы исключить возможности различать пиксели, необходимо, чтобы их количество на дюйм было существенно больше. Отметим, что большинство современных систем VR имеют общее разрешение выше, чем у современных мониторов, однако при малом расстоянии и увеличении событий сцен пользователь по-прежнему наблюдает промежутки между отдельными пикселями – «эффект москитной сетки» [8]. С целью уменьшения данного искажения необходимо использовать специальное сочетание дисплеев и линз. Зачастую производители для снижения веса шлема применяют пластиковые линзы и/или линзы Френеля, что не лучшим образом сказывается на качестве изображения.

Самым же эффективным способом является увеличение плотности пикселей и одновременное снижение расстояния между ними. Для формирования естественного восприятия смоделированной сцены VR необходимо повышать частоту смены кадра в секунду.

Внедрение стандарта Res.2020 поможет более полному погружению в VR из-за расширения цветового охвата, увеличения глубины цвета для каждого канала RGB и повышения частоты кадров. Res.2020 позволяет охватить до 75,8 % цветового пространства CIE 1931 (рис. 2). Количество бит возрастает до 10 или 12 на каждый цвет RGB [9]. Максимальная частота обновления повышается до 120 Hz. Цветовая субдискретизация улучшается с 4:2:0 до 4:2:2 или 4:4:4.

Однако увеличение количества кадров и повышение разрешения изображения накладывает определенные условия на минимальную полосу про-

пускания и пропускную способность канала передачи и на узлы обработки информации. Если для частоты обновления 60 Hz при 1080P сигналу достаточно полосы пропускания 149 MHz, то для 4 K нужно 594 MHz, а для частоты обновления изображения при 1080P сигналу потребуется 297 MHz, для 4 K – 1,19 GHz.

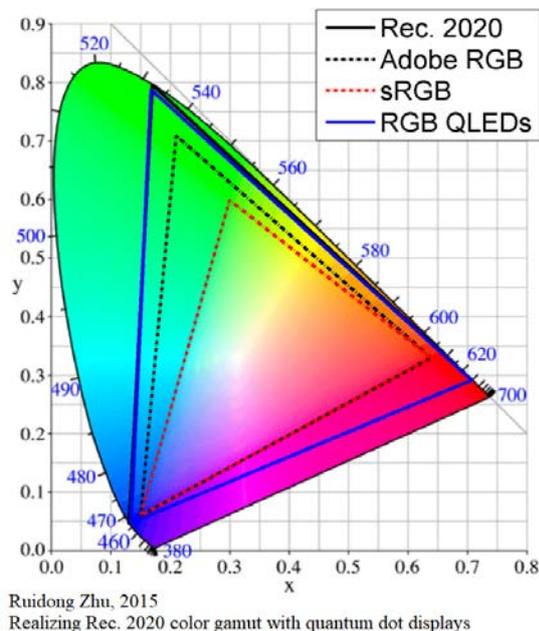


Рис. 2. Локус цветковых пространств

В настоящее время для систем VR максимальная частота обновления кадров составляет 90–120 Гц, что является недостаточным и приводит к формированию низкополигональных сцен и изображений.

**Беспроводная передача данных в системах VR.** К основным способам беспроводной передачи данных можно отнести для мультимедийного контента WiFi 802.11ac (WiFi 5), 802.11ax (WiFi 6), сети поколений 4G и 5G (архитектура идентична WiFi 6), для параметрических данных Bluetooth (также возможна передача аудио), ZigBee и ранние версии WiFi (например, WiFi 4). Сводная информация параметров беспроводных протоколов передачи данных приведена в табл. 1.

Широко распространенные системы WiFi 5 не способны передать сжатое видео, а на кодирование и декодирование требуется время. Задержки в несколько миллисекунд критичны при работе в VR. Например, при использовании распространенных кодеков H.264 (1080P @60Hz 4:2:2) и H.265 (4K@60 Hz 4:2:0) задержка может достигать нескольких секунд, а канал должен обеспечивать скорость до 20 и до 40 Mbit/s соответственно. Для кодека MJPEG2000 (4K@60 Hz 4:2:0) характерна задержка 30–90 ms и требуется до 850 Mbit/s. У кодека SDVOE(4K 60 Hz 4:2:2) задержка равна 0,1 ms, но для использования требуется обеспечить прохождения потока до 9 Gbit/s. Современный протокол WiFi 6 позволяет работать в диапазонах 2,4 и 5 ГГц, что

обеспечивает высокую скорость передачи информации в VR (в 4–10 раз быстрее, чем WiFi 5). За счет большой пропускной способности WiFi 6 способен поддерживать до 12 выходных каналов, четыре из которых в диапазоне 2,4 ГГц и восемь в диапазоне 5 ГГц соответственно [10–12]. WiGig работает на собственной частоте 60 ГГц для беспроводной передачи видео потока VR на скорости до 4,6 Гбит/с на короткие расстояния [8].

Таблица 1

Параметры беспроводных протоколов передачи данных

	Bluetooth	ZigBee	WiFi 4	WiFi 5	WiFi 6	WiHD
IEEE Standard	802.15.1	802.15.4	802.11n	802.11ac	802.11ax	802.15.3c
Frequency	2.4 GHz	900 MHz/ 2.4 GHz	2.4 GHz/ 5.1–5.8 GHz	5.1–5.8 GHz	5.1–5.8 GHz	57–66 GHz
Maximum bit rate	1 Mbit/s	250 Kbit/s	450 Mbit/s	1.3 Gbit/s	10 Gbit/s	2 Gbit/s
Nominal range, metr	10	100	100	100	100	10
Number of RF channels	79	16	24	24	Multiple	Multiple
Channel bandwidth	1 MHz	0.3–0.6 MHz, 2 MHz	40 MHz	Up to 160MHz	Up to 160MHz	2.16 GHz
Modulation system	GFSK	BPSK, OPSK	OFDM	OFDM / 256QAM	1024QAM	OFDM/ 256QAM
Применимость для VR	–	–	–	+	+	+

При беспроводной передаче информации на несколько систем VR возникают сложности интерференции входных сигналов. Данная проблема влияет на скорость и качество передачи информации. Однако увеличение скорости передачи данных возможно за счет расширения полосы пропускания канала, уменьшения вероятности ошибки передачи информации, а также за счет увеличения мощности сигнала. Основными проблемами, ограничивающими реализацию данного подхода, являются рассеяние энергии сигнала во времени и влияние внешних аддитивных помех.

Данная проблема частично решается при использовании технологии Multiple Input Multiple Output MIMO [13, 14]. Реализовать данную технологию позволяет передача информации несколькими антеннами с корреляцией замираний сигналов. Диверсифицированный режим позволит улучшить качество и дальность связи за счет уменьшения локальных зон неуверенного приема. В этом случае общий поток информации в системе VR будет делиться на несколько подпотоков, а затем передаваться в общий канал связи, что позволит улучшить емкость беспроводного канала, спектральную эффективность и скорость передачи информации при неизменной полосе частот. При этом канальная скорость передачи повышается пропорционально числу используемых антенн.

### **Передача информации по проводным интерфейсам в системах VR**

Качественное погружение в виртуальную реальность требует повышенной вычислительной нагрузки. Автономные VR на данном этапе развития не способны к созданию эффекта безупречного погружения. В свою очередь, шлем и вычислительное устройство требуют широкополосный, помехозащищенный и быстродействующий канал связи. Пока такое возможно только по проводам. Это позволяет не учитывать автономность работы шлема, но накладывает ограничения на удаленность пользователя VR от вычислительного устройства.

Одним из основных способов, посредством которого осуществляется передача сигнала в среде VR, является HDMI интерфейс. Данный интерфейс позволяет передавать видеопоток данных высокой четкости (HDTV). Используя HDMI, можно объединить устройства VR посредством четырех линий [14]. Одной из главных проблем HDMI-интерфейса является появление в канале гармоник тактового сигнала. Причиной их появления является работа без фильтрующих элементов между персональным компьютером и разъемом HDMI.

Одним из способов решения данной проблемы является использование высококачественного HDMI-кабеля. Использование данных средств является существенным барьером, защищающим кабельное соединение от влияния посторонних сигналов и флуктуационного шума, что позволяет уменьшить вероятность искажения и потери части аудио-визуального контента VR и получить на выходе информацию с высокими показателями мощности и качества полезного сигнала.

Другим способом проводной передачи данных, нашедшим широкое применение в системах VR, является DisplayPort интерфейс. DisplayPort – это универсальный цифровой интерфейс, включающий возможности передачи звука и изображения, обеспечивающий одновременный двусторонний обмен информацией между персональным компьютером и системой VR [15].

В интерфейсе DisplayPort может использоваться до четырех шин в зависимости от необходимой полосы пропускания сигнала. Суммарная полоса пропускания основного канала при использовании всех четырех шин превосходит полосы HDMI. Современный интерфейс DisplayPort 1.4 обеспечивает скорость передачи данных до 32,4 Гбит/с, подключение до четырех дисплеев к одному персональному компьютеру, поддержку 8K-разрешение и DSC (Display Stream Compression) [14, 16].

Применение режима Alt на разъемах USB type C для HDMI и DisplayPort позволяет уменьшить количество подключаемых интерфейсных кабелей и увеличить уровень интеграции плат графического контроллера, стереодисплея, параметрических датчиков VR и обеспечить их питанием.

Анонсируемое появление DisplayPort 2.0 переведет VR на более высокий уровень. Например, появится возможность подключения дисплея с разрешением 16K (15360×8460), частотой обновления экрана 60 Hz и глубиной цвета 30 bit 4:4:4 HDR (с DSC) или 10K (10240×4320)@60 Hz и 24 bit 4:4:4 (без компрессии). Сводная информация параметров проводных интерфейсов передачи данных приведена в табл. 2 (HDR-High dynamic range; DSC – Display stream compression).

Таблица 2

## Параметры проводных интерфейсов передачи данных

Интерфейс	Max bit rate, GBit/s	Максимальное разрешение	Глубина цвета для 4K	Поддержка HDR	Поддержка DSC	Alt mode USB Type-C
HDMI 1.4b	10.2	4K@30Hz	8bit	–	–	–
HDMI 2.0b	18	5K@30Hz	8bit	–	–	+
HDMI 2.1	48	10K@30Hz	16bit	+	1.2	+
DP 1.2	21.6	5K@30Hz	10bit	–	–	–
DP 1.3	32.4	8K@30Hz	16bit	–	–	+
DP 1.4	32.4	8K@30Hz	16bit	+	1.2	+
DP 2.0	80	16K@60Hz	30bit	+	1.2a	+

В отличие от HDMI, DisplayPort обладает малым уровнем электромагнитных помех, использует надежное шифрование данных и гибкое распределение доступной полосы пропускания аудио-визуального контента в системах VR.

### Заключение

Технология VR позволяет конструировать искусственный мир, передаваемый человеку через его восприятие (зрение, слух, эмоции). Синергетический эффект VR и технологий беспроводной/проводной передачи информации позволит обеспечить бесперебойную работу систем VR и увеличить скорость загрузки аудио-визуального контента о сценах и событиях реального мира.

Для обеспечения полного эффекта погружения, когда пользователь не способен отличить виртуальный мир от реальных событий, необходимо использовать WiGig (802.11ad), WiFi 6 (802.11ax), WiHD (802.15.3c) и DisplayPort 2.0, обеспечивающих высокую скорость передачи информации. Перспективными проводными каналами коммуникаций технологий VR для проводных соединений является канал передачи Display Port 2.0, для беспроводной передачи – сети пятого поколения, а также применение компрессии DSC. Результатом адекватной передачи данных по различным каналам связи станет создание новых технологий визуализации, которые позволят достичь цветового охвата стандарта Rec.2020 для дисплеев на квантовых точках.

В будущем технология VR будет представлять собой совокупность сложных технологических решений и разработок в сфере математики, физики, инженерии, философии, психологии и других наук. Создание подобных комплексных решений для нужд здравоохранения, образования, промышленности позволит обеспечить цифровизацию экономики страны и соответствующих отраслей производства.

### Библиографический список

1. **Gigante, M. A.** Virtual reality: definitions, history and applications / M. A. Gigante // Virtual Real. Syst. – 1993. – P. 3–14.
2. **Rosen, J.** Evolution of virtual reality (Medicine) / J. Rosen, D. Laub, H. Soltanian, R. Redett // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. – 1996. – Vol. 15 (2). –P. 16–22.

3. **Suvorov, K. A.** Virtual reality system and their application / K. A. Suvorov // *T-Comm.* – 2013. – № 9. – P. 140–143.
4. **Faleev, D. S.** A comparative analysis of our virtual reality systems and features of their design / D. S. Faleev // *Youth Scientific and Technical Bulletin.* – 2012. – № 3. – 6 p.
5. **Tapani Levola** Diffractive optics for virtual reality displays / Tapani Levola // *Society for Image Display.* – 2006. – Vol. 14. – 8 p.
6. *Virtual, Augmented and Mixed Reality Systems Study Guide* / A. A. Smolin, D. D. Zhdanov, I. S. Potemin, A. V. Mezhenin, V. A. Bogatyrev. – St. Petersburg : ITMO University, 2018 – 59 p.
7. **Rakkolainen, I.** Field-of-view extension for VR viewers / I. Rakkolainen, T. Höllerer // *Conference: the 21st International Academic Mindtrek Conference, 2017.* – 4 p.
8. **Navarro, F.** Integrating 3D Reconstruction and Virtual Reality: A New Approach for Immersive Teleoperation / F. Navarro // *ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference, 2018.* – P. 606–616.
9. **Zhu, R.** Realizing Rec. 2020 color gamut with quantum dot displays / R. Zhu // *Optics Express.* – 2015. – Vol. 23. – P. 680–693.
10. **Elbamby, M.** Towards Low-Latency and Ultra-Reliable Virtual Reality / M. Elbamby, C. Perfecto, M. Bennis, K. Doppler // *IEEE Network.* – 2018. – № 32 (2). – 8 p.
11. Huawei Technologies Co., Ltd. *Virtual Reality/Augmented Reality White Paper* / China Academy of Information and Communications Technology (CAICT), 2017. – 38 p.
12. **Lewicki, A.** A Virtual Prototype for Bluetooth over Ultra Wide Band System Level Design / A. Lewicki, J. Talayssat // *Conference: Design, Automation and Test in Europe, DATE, 2008.* – 4 p.
13. Semi Round Robin Pairing and Scheduling in Uplink Virtual Multiple Input Multiple Output (VMIMO) communications // *Journal of Space Technology.* – 2014. – № 4 (1). – P. 61–66.
14. Kramer Electronics. – URL: <https://www.kramer.ru>
15. **Bamodul, O.** Virtual Reality and Virtual Reality System Components / O. Bamodul // *Proceedings of the 2nd International Conference On Systems Engineering and Modeling (ICSEM-13), 2013.* – P. 921–924.
16. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Технологии виртуальной и дополненной реальности». – Москва, 2019. – 50 с.

### **References**

1. Gigante M. A. *Virtual Real. Syst.* 1993, pp. 3–14.
2. Rosen J., Laub D., Soltanian H., Redett R. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine.* 1996, vol. 15 (2), pp. 16–22.
3. Suvorov K. A. *T-Comm.* 2013, no. 9, pp. 140–143.
4. Faleev D. S. *Youth Scientific and Technical Bulletin.* 2012, no. 3, 6 p.
5. Tapani Levola *Society for Image Display.* 2006, vol. 14, 8 p.
6. Smolin A. A., Zhdanov D. D., Potemin I. S., Mezhenin A. V., Bogatyrev V. A. *Virtual, Augmented and Mixed Reality Systems Study Guide.* Saint-Petersburg: ITMO University, 2018, 59 p.
7. Rakkolainen I., Höllerer T. *Conference: the 21st International Academic Mindtrek Conference.* 2017, 4 p.
8. Navarro F. *ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference.* 2018, pp. 606–616.
9. Zhu R. *Optics Express.* 2015, vol. 23, pp. 680–693.
10. Elbamby M., Perfecto C., Bennis M., Doppler K. *IEEE Network.* 2018, no. 32 (2), 8 p.
11. *Huawei Technologies Co., Ltd. Virtual Reality/Augmented Reality White Paper.* China Academy of Information and Communications Technology (CAICT), 2017, 38 p.

12. Lewicki A. A., Talayssat J. *Conference: Design, Automation and Test in Europe, DATE*. 2008, 4 p.
13. *Journal of Space Technology*. 2014, no. 4 (1), pp. 61–66.
14. *Kramer Electronics*. Available at: <https://www.kramer.ru>
15. Bamodul O. *Proceedings of the 2nd International Conference On Systems Engineering and Modeling (ICSEM-13)*. 2013, pp. 921–924.
16. *Dorozhnaya karta razvitiya «skvoznoy» tsifrovoy tekhnologii «Tekhnologii virtual'noy i dopolnennoy real'nosti»* [Roadmap for the development of “interface” digital technology “Technologies of virtual and augmented reality”]. Moscow, 2019, 50 p. [In Russian]

---

***Тычков Александр Юрьевич***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра радиотехники  
и радиоэлектронных систем, заведующий  
лабораторией «Биомедицинские  
и когнитивные технологии»  
Научно-исследовательского института  
фундаментальных и прикладных  
исследований, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [tychkov-a@mail.ru](mailto:tychkov-a@mail.ru)

***Tychkov Aleksandr Yur'evich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of radio engineering  
and radioelectronic systems, head  
of the laboratory “Biomedical  
and Cognitive Technologies”, Research  
Institute for basic and applied studies,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

***Грачев Андрей Владимирович***

начальник отдела технических средств  
обучения, ассистент, кафедра  
радиотехники и радиоэлектронных  
систем, Пензенский государственный  
университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [rtech@pnzgu.ru](mailto:rtech@pnzgu.ru)

***Grachev Andrey Vladimirovich***

Head of the educational technology  
department, assistant, sub-department  
of radio engineering and radioelectronic  
systems, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Алимурадов Алан Казанферович***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
научный сотрудник лаборатории  
«Биомедицинские и когнитивные  
технологии» Научно-исследовательского  
института фундаментальных  
и прикладных исследований, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [alansapfir@yandex.ru](mailto:alansapfir@yandex.ru)

***Alimuradov Alan Kazanferovich***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of radio  
engineering and radioelectronic systems,  
researcher of the laboratory “Biomedical  
and Cognitive Technologies”, Research  
Institute for basic and applied studies,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Чураков Петр Павлович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационно-измерительной  
техники и метрологии, главный  
научный сотрудник лаборатории  
«Биомедицинские и когнитивные  
технологии» Научно-исследовательского  
института фундаментальных  
и прикладных исследований, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: churakov-pp@mail.ru

**Churakov Petr Pavlovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of information  
and measuring equipment and metrology,  
principal researcher of the laboratory  
“Biomedical and Cognitive Technologies”,  
Research Institute for basic and applied  
studies, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Тычков, А. Ю. Исследование особенностей передачи мультимедийной и параметрической информации в среде виртуальной реальности / А. Ю. Тычков, А. В. Грачев, А. К. Алимуратов, П. П. Чураков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 27–38. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-3.

## АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА НЕОДНОРОДНОМ ФОНЕ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования является оптико-электронная система обнаружения беспилотных летательных аппаратов и бронетанковой техники. Предметом исследования являются методы выделения и классификации движущегося объекта на сложном неоднородном фоне. Цель – разработка алгоритма обнаружения и классификации беспилотного летательного аппарата и бронетанковой техники оптико-электронной системой на неоднородном фоне в режиме реального времени.

*Материалы и методы.* Представленные исследования выполнены с использованием методов обработки видеоизображений для выделения объекта и нейронные сети для классификации объекта. Алгоритм разработан на языке программирования Python с использованием библиотеки компьютерного зрения OPENCV.

*Результаты.* Предложен метод выделения и классификации беспилотного летательного аппарата и бронетанковой техники на сложном динамическом фоне. Алгоритм использует угловой детектор Харриса для обнаружения объектов на фоне изображений. Создана и обучена нейронная сеть для быстрой классификации объекта.

*Выводы.* Предложенный метод может быть использован при разработке оптико-электронной системы обнаружения движущегося беспилотного летательного аппарата и бронетанковой техники на неоднородном фоне в режиме реального времени в инфракрасном диапазоне. В результате выявлено, что предложенный алгоритм уверенно справляется с обнаружением и классификацией контрастного объекта, находящегося на расстоянии до 2 км от системы обнаружения.

**Ключевые слова:** оптико-электронная система, беспилотный летательный аппарат, бронетанковая техника, адаптация, нейронные сети.

*A. A. Chernikov, A. I. Purtov, I. V. Prokof'ev, V. P. Yushchenko*

## ALGORITHM FOR OBJECTS' DETECTING AND CLASSIFICATION ON A HETEROGENEOUS BACKGROUND

### Abstract.

*Background.* The object of the research is an optoelectronic detection system for unmanned aerial vehicles and armored vehicles. The subject of the research is the methods of identifying and classifying a moving object against a complex non-uniform background. The aim of the research is to develop an algorithm for the objects' detecting and classification of an unmanned aerial vehicle and armored vehicles by an optoelectronic system against a non-uniform background in real time.

---

© Черников А. А., Пуртов А. И., Прокофьев И. В., Ющенко В. П., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

*Materials and methods.* The presented studies were carried out using video image processing methods to select an object and neural networks to classify an object. The algorithm is developed in the Python programming language using the OPENCV computer vision library.

*Results.* A method for identifying and classifying an unmanned aerial vehicle and armored vehicles against a complex dynamic background is proposed. The algorithm uses a Harris angle detector to detect objects in the background of images. Created and trained a neural network for fast object classification.

*Conclusion.* The proposed method can be used to develop an optoelectronic system for detecting a moving unmanned aerial vehicle and armored vehicles against a non-uniform background in real time in the infrared range. Because of the work, it was revealed that the proposed algorithm reliably copes with the detection and classification of a contrasting object located at a distance of up to 2 km from the detection system.

**Keywords:** optoelectronic system, unmanned aerial vehicle, armored vehicles, adaptation, neural networks.

### **Введение**

На сегодня алгоритмы обнаружения и классификации объектов имеют широкий спектр применения в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), робототехнике и системах оптической локации транспорта. Разработано большое количество алгоритмов сопровождения объектов, каждый из которых характеризуется определенными требованиями к типам фоновой обстановки, при которых алгоритм работоспособен [1–5]. Во многих случаях, имея априорные сведения о фоновой обстановке, можно выбрать алгоритм слежения за объектами, обеспечивающий высокие качественные показатели слежения. Однако достаточно часто, особенно при работе автономных комплексов анализа изображений реального времени, априорные сведения о фоновой обстановке отсутствуют, так же как и отсутствует возможность оперативного вмешательства оператора для задания типа фоновой обстановки. В данной ситуации необходимо использовать алгоритмы слежения за объектами, работоспособные в широком диапазоне условий наблюдения.

Можно выделить две характерные черты систем технического зрения: необходимость работы в реальном масштабе времени и автономность режима функционирования этих систем. Важной проблемой является обнаружение и сопровождение объектов, находящихся в поле зрения датчика изображений.

Описанный алгоритм обнаружения и классификации объектов работает с полутоновыми изображениями. Полутоновые изображения также называются монохромными, или изображениями в оттенках серого, а значение, получаемое после преобразования, – интенсивностью или яркостью точки.

### **Метод обнаружения объектов на неоднородном фоне**

Для обнаружения объекта в видеопоследовательности был применен угловой детектор Харриса. Угловой детектор Харриса – это стандартный метод определения точек интереса на изображении. Несмотря на появление множества детекторов за последнее десятилетие, он продолжает оставаться эталонным методом, который обычно используется для калибровки камеры, сопоставления изображений и отслеживания.

Идея метода Харриса состоит в обнаружении точек на основе изменения интенсивности в локальной окрестности: небольшая область вокруг объекта должна показывать большое изменение интенсивности при сравнении с окнами, смещенными в любую сторону.

Эта идея может быть выражена через автокорреляционную функцию. Углы определяются как точки  $x$ , которые увеличивают последующие функции на малые сдвиги  $h$ , т.е. максимальное отклонение в любом направлении:

$$E(h) = \sum w(x)(I(x+h) - I(x))^2.$$

Функция  $w(x)$  позволяет выбрать область поддержки (supportregion), которая обычно определяется как прямоугольная или гауссова функция. Разложение в ряд Тейлора можно использовать для линеаризации выражения, при этом правая часть выглядит следующим образом:

$$E(h) = \sum w(x)(\nabla I(x)h)^2 dx = \sum w(x)(h^T \nabla I(x) \nabla I(x)^T h).$$

Последнее выражение зависит от градиента изображения через матрицу автокорреляции или структурного тензора, который задается как

$$M = \sum w(x)(\nabla I(x) \nabla I(x)^T) = \begin{pmatrix} \sum w(x) I_x^2 & \sum w(x) I_x I_y \\ \sum w(x) I_x I_y & \sum w(x) I_y^2 \end{pmatrix}.$$

Максимумы находятся путем анализа этой матрицы. Наибольшее собственное значение  $M$  соответствует направлению наибольшего изменения интенсивности, при этом второе по величине соответствует изменению интенсивности в его ортогональном направлении. Анализируя их значения, получаем три возможных ситуации:

1. Оба собственных значения малы,  $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx 0$ , тогда область, вероятно, будет однородной областью с изменениями интенсивности вследствие шума.

2. Одно из собственных значений много больше другого,  $\lambda_1 \gg \lambda_2 \approx 0$ , тогда область, скорее всего, принадлежит ребру, причем наибольшее собственное значение соответствует ортогональному направлению края.

3. Оба собственных значения велики,  $\lambda_1 > \lambda_2 \gg 0$ , тогда область, вероятно, будет содержать большие изменения интенсивности в двух ортогональных направлениях, поэтому соответствует угловой структуре.

Из сказанного следует, что угловой детектор Харриса является математическим способом определения участков, вызывающих наибольшие изменения исследуемых параметров при перемещении в заданном направлении. К каждому участку привязана своя оценочная величина, по которой можно определить, что в исследуемой области являются углом, а что нет.

Результаты обработки алгоритма с применением углового детектора Харриса приведены на рис. 1.

### Метод классификации объектов на неоднородном фоне

Искусственные нейронные сети являются одними из основных инструментов, используемых для задач классификации объектов [6]. Нейронные сети

состоят из входного и выходного слоев, а также (в большинстве случаев) скрытого слоя, состоящего из блоков, которые преобразуют входные данные в то, что может использовать выходной слой (рис. 2).

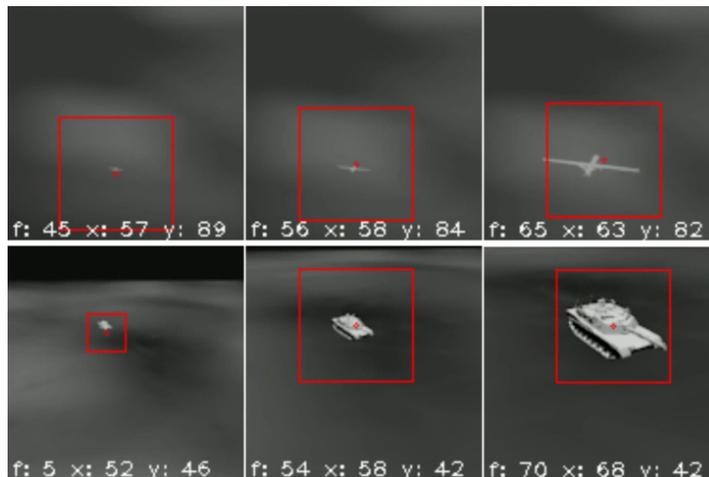


Рис. 1. Результат обработки кадров инфракрасного видео

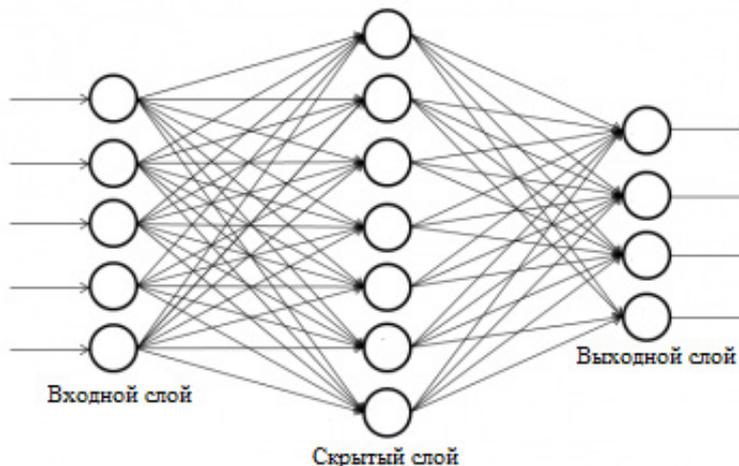


Рис. 2. Последовательность действий в нейронной сети

В рамках данного исследования для решения задачи классификации используется стандартная трехслойная архитектура нейронной сети прямого распространения. Обучение нейронной сети прямого распространения основывается на вычислении функции ошибки методом обратного распространения ошибки. В качестве методов обучения используются методы, основанные на оптимизации стохастического градиента и подразделяющиеся на методы первого и второго порядков в зависимости от порядка используемых производных функции ошибки.

Важными параметрами при построении нейронной сети после выбора метода обучения являются оптимальное число нейронов на скрытом слое и способ начальной инициализации весов.

Разработанный алгоритм [7] работает следующим образом:

- на первом этапе кадр видеопотока обрабатывает матрица повышающая контраст изображения [8–10];
- на втором этапе вычисляется положение объекта с помощью углового детектора Харриса;
- на третьем этапе обученная нейронная сеть обрабатывает выделенную область предполагаемого объекта для его классификации.

Во многих случаях получаемые бинарные изображения содержат элементы, ложно отнесенные к объектам. Поэтому для улучшения качества обнаружения следует осуществить дополнительную обработку получаемого бинарного изображения. Суть обработки заключается в последовательном применении процедур морфологического закрытия и открытия с квадратным структурирующим элементом заданного размера. В процессе параметризации сегментов вычисляются координаты их центров, габаритные размеры, площадь и другие параметры. Исходя из параметров сегментов и имеющейся априорной информации системой принимается решение об обнаружении объектов в кадре.

### Результаты

Для определения работоспособности алгоритма по дальности смоделированы инфракрасные видеоматериалы с беспилотным летательным аппаратом и бронетанковой техникой на разных подстилающих поверхностях. Моделирование происходило в среде Blender 2.8. Результат обработки двух видео показан на рис. 3, полученном при моделировании сцены с движущимся объектом в инфракрасном спектральном диапазоне с частотой 25 кадров/с.

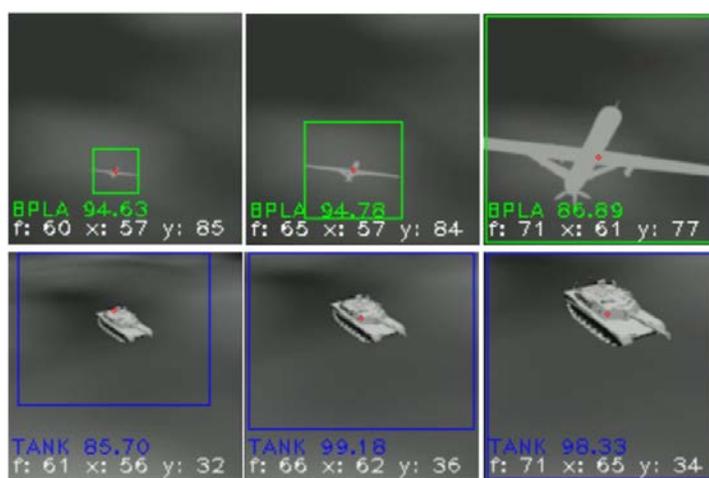


Рис. 3. Результаты классификации объектов нейронной сетью

### Заключение

Предложенный алгоритм уверенно справляется с обнаружением и классификацией контрастного объекта, находящегося на расстоянии до 2 км от системы обнаружения с разрешением камеры 125×125 пикселей. Наилучший результат достигается для тех изображений, на которых объекты расположе-

ны на однородном фоне. На работу алгоритма практически не влияет затененность, а в некоторых случаях она даже способствует получению лучшего результата. Достоинством разработанного алгоритма является быстроедействие системы обнаружения и классификации беспилотных летательных аппаратов и наземной техники.

#### **Библиографический список**

1. **Li, J.** Detection of small moving object sinima gesequences / J. Li, Z. Shen, L. Bao // Automatic targe trecognition IV: Proc. Of SPIE. – 1997. – Vol. 3069. – P. 511–517.
2. **Алпатов, Б. А.** Алгоритм обработки изображений для систем автоматического сопровождения воздушных объектов / Б. А. Алпатов, А. Н. Блохин, В. С. Муравьев // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – № 4. – С. 12–17.
3. **Борисова, И. В.** Обнаружение объектов на тепловых изображениях / И. В. Борисова, В. Н. Горенок, В. Н. Захарова // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : тр. Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 19–22 апреля 2011 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 186–190.
4. **Ciresan, D.** Multi-column Deep Neural Networks for Image Classification (CVPR) / D. Ciresan, J. Schmidhuber // IEEE Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition. – 2012. – P. 3642–3649.
5. **Федотов, Н. Г.** Анализ полутоновых изображений и цветных текстур с позиции стохастической геометрии и функционального анализа / Н. Г. Федотов, Д. А. Голдуева, М. А. Мокшанина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 29–41.
6. **He, K.** Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Proc. of the IEEE conf. on computer vision and pattern recognition. – Las Vegas, 2016. – P. 770–778.
7. **Седжвик, Р.** Программирование на языке Python : учебный курс : пер. с англ. / Р. Седжвик, К. Уэйн, Р. Дондеро. – Санкт-Петербург : ООО «Альфа-книга», 2017. – 736 с.
8. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва : Техносфера, 2005. – 1072 с.
9. Отчет о НИР «Состояние и перспективы развития матричных ФПУ для многоспектральных ГСН», шифр «Нейрон», № гос. рег. У90056, инв. № Е79158. ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт оптических систем», научный рук. Легкий В. Н. – Новосибирск, 2007. – 53 с.
10. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.

#### **References**

1. Li J., Shen Z., Bao L. *Automatic targe trecognition IV: Proc. Of SPIE*. 1997, vol. 3069, pp. 511–517.
2. Alpatov B. A., Blokhin A. N., Murav'ev V. S. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. 2010, no. 4, pp. 12–17. [In Russian]
3. Borisova I. V., Gorenok V. N., Zakharova V. N. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 19–22 aprelya 2011 g.)* [Automation and control problems in technical systems: proceedings of the International scientific and engineering conference (Penza, April 19-22, 2011)]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, vol. 1, pp. 186–190. [In Russian]
4. Ciresan D., Schmidhuber J. *IEEE Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*. 2012, pp. 3642–3649.

5. Fedotov N. G., Goldueva D. A., Mokshanina M. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 2 (42), pp. 29–41. [In Russian]
6. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. *Proc. of the IEEE conf. on computer vision and pattern recognition*. LasVegas, 2016, pp. 770–778.
7. Sedzhvik R., Ueyn K., Dondero R. *Programmirovanie na yazyke Python: uchebnyy kurs: per. s angl.* [Python programming: a training course: translated from English]. Saint-Petersburg: ООО «Al'fa-kniga», 2017, 736 p. [In Russian]
8. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital imaging]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1072 p. [In Russian]
9. *Otchet o NIR «Sostoyanie i perspektivy razvitiya matrichnykh FPU dlya mnogospetral'nykh GSN», shifr «Neyron», № gos. reg. U90056, inv. № E79158* [Report on the Scientific Research “State and development prospects of matrix FPU for multispectral GOS”, cipher “Neuron”, state registration No. U90056, inv. No. E79158]. FGUP «Sibirskiy nauchno-issledovatel'skiy institut opticheskikh sistem», nauchnyy ruk. Legkiy V. N. Novosibirsk, 2007, 53 p. [In Russian]
10. Gruzman I. S., Kirichuk V. S., Kosykh V. P., Peretyagin G. I., Spektor A. A. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh* [Digital image processing in information systems]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002, 352 p. [In Russian]

---

**Черников Андрей Андреевич**

аспирант, Новосибирский  
государственный технический  
университет (Россия, г. Новосибирск,  
пр. К. Маркса, 20)

E-mail: ancher1994@gmail.com

**Chernikov Andrey Andreevich**

Postgraduate student, Novosibirsk  
State Technical University  
(20 K. Marksa avenue, Novosibirsk, Russia)

**Пуртов Антон Игоревич**

аспирант, Новосибирский  
государственный технический  
университет (Россия, г. Новосибирск,  
пр. К. Маркса, 20)

E-mail: a.p.93@mail.ru

**Purtov Anton Igorevich**

Postgraduate student, Novosibirsk  
State Technical University  
(20 K. Marksa avenue, Novosibirsk, Russia)

**Прокофьев Иван Валерьевич**

аспирант, Новосибирский  
государственный технический  
университет (Россия, г. Новосибирск,  
пр. К. Маркса, 20)

E-mail: prokofev.ivan.93@mail.ru

**Prokof'ev Ivan Valer'evich**

Postgraduate student, Novosibirsk  
State Technical University  
(20 K. Marksa avenue, Novosibirsk, Russia)

**Ющенко Валерий Павлович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра автономных информационных  
и управляющих систем, Новосибирский  
государственный технический  
университет (Россия, г. Новосибирск,  
пр. К. Маркса, 20)

E-mail: yushhenko@corp.nstu.ru

**Yushchenko Valeriy Pavlovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of autonomous  
information and control systems,  
Novosibirsk State Technical University  
(20 K. Marksa avenue, Novosibirsk, Russia)

**Образец цитирования:**

Черников, А. А. Алгоритм обнаружения и классификации объектов на неоднородном фоне / А. А. Черников, А. И. Пуртов, И. В. Прокофьев, В. П. Ющенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 39–46. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-4.

## ОБРАБОТКА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРОВ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Развитие мобильных технологий привело к появлению возможности выполнять диагностику состояния покрытия улиц и автодорог с использованием данных, полученных с датчиков абонентских устройств, которые не всегда являются надежными источниками информации. Таким образом, целью настоящей работы является повышение вероятности обнаружения поверхностных дефектов автомобильных дорог в условиях наличия пропусков в исходных данных.

*Материалы и методы.* Предложен подход к обнаружению поверхностных дефектов покрытия автомобильных дорог на основе анализа данных, фиксируемых мобильными устройствами в процессе движения. Вследствие сложности обработки и передачи визуально-фиксируемой информации с видеокамеры мобильного устройства в предложенном подходе для фиксации дефектов покрытия применяются данные акселерометра и GPS/ГЛОНАСС-приемника. Поскольку ненадежность акселерометра и возможные сбои в передаче результатов измерений по сотовой сети приводят к пропускам в исходных данных, предлагаемый подход базируется на последовательном применении вейвлет-преобразования и интеллектуального нейросетевого анализа, что обеспечивает повышение вероятности обнаружения поверхностных дефектов автомобильных дорог.

*Результаты.* На основе предложенного подхода разработана система диагностики состояния покрытия автомобильных дорог. Проведена экспериментальная апробация системы на двух участках улично-дорожной сети, различных по качеству поверхностного покрытия и скоростным режимам.

*Выводы.* Результаты исследования показали, что вероятность распознавания дефектов дорожного покрытия составила 0,95, таким образом, достигнуты высокие показатели относительно аналогичных решений.

**Ключевые слова:** неэквидистантность, акселерометр, датчик, нейросеть, мобильное устройство.

О. К. Golovnin, S. A. Prokhorov, A. A. Stolbova

## PROCESSING TIME SERIES OF MEASUREMENTS BASED ON THE WAVELET SPECTRA INTELLECTUAL

© Головнин О. К., Прохоров С. А., Столбова А. А., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

## ANALYSIS IN SURVEY SYSTEMS FOR ROAD PAVEMENT DEFECTS DETECTION

### Abstract.

*Background.* The growth of mobile technologies led to the ability to survey the condition of road pavement on streets and highways using data received from sensors of mobile devices, which are not always reliable information sources. Thus, this work is focused on the improvement of road pavement defect detection in case of missing fragments in the initial data.

*Materials and methods.* The research proposes an approach to pavement defects detection based on the analysis of data collected by mobile devices. Due to the complexity of processing and transmission of video recordings from a mobile device's camera, the proposed approach uses data from an accelerometer and a GPS/GLONASS receiver. The unreliability of the accelerometers and possible failures in the transmission of measurement results over the cellular network lead to missing fragments in the initial data, that is why the proposed approach is based on the sequential implementation of Wavelet transform and intelligent neural network analysis, which together provides an increase in the probability of pavement defects detection.

*Results.* Based on the proposed approach, a system for survey the state of the road pavement was developed. Experimental testing of the system was carried out on two sections of the road network. Test sections are different in the quality of the pavement and speed modes.

*Conclusions.* The results of the study showed that the probability of road pavement detection was 0.95, thus, high rates were achieved relative to similar solutions.

**Keywords:** nonequidistance, accelerometer, sensor, neural network, mobile device.

### Введение

Наличие дефектов в поверхностном покрытии улиц и автострад приводит к снижению скоростей движения и повышенной аварийности, сопровождающейся травматизмом, повреждениями транспортных средств, грузов, транспортной инфраструктуры, поэтому анализ качества дорожного покрытия играет важную роль как в процессе диагностики и транспортного обслуживания, так и в процессе внедрения передовых средств управления транспортом [1].

В настоящий момент разработаны способы обнаружения поверхностных дефектов покрытия автодорог на основе данных, полученных с помощью различных технических средств: лазерных датчиков [2], ультразвуковых реек [3], мобильных устройств [4], средств фото- и видеофиксации передвижных дорожных лабораторий наземного [5, 6] и воздушного базирования [7, 8].

Методы анализа полученной измерительной информации получили достаточный уровень проработки в научно-техническом сообществе [9]. Так, в [10] описан метод опорных векторов, который позволяет обнаружить дефекты с вероятностью 0,80 на основе данных, полученных с внешних камер, а также простых камер смартфонов. В работе [11] для определения качества дорог предложены методы автоматизированного обнаружения дефектов покрытия по изображениям на основе вычисления векторов Фишера на локальных дескрипторах масштабно-инвариантной трансформации признаков.

В работе [12] рассматриваются способы сокращения времени и затрат, необходимых для выполнения регулярной записи визуальных данных о состоянии дорог. В статье [13] для постобработки данных, а именно для корректировки освещенности в задаче определения трещин покрытия, применяется метод k-means. Вопросы обнаружения трещин в дорожном покрытии рассматриваются также в [14], где приводится алгоритм, основанный на случайных структурированных лесах. Однако подходы, основанные на анализе визуально фиксируемых свойств покрытия, все еще затруднительно использовать в сложных условиях видимости, например, при неблагоприятных погодных условиях или в плотном транспортном потоке [15]. Другой существенный недостаток таких подходов – ощутимые затраты на обработку записей с высоким разрешением.

Исследования возможностей применения лазерных технологий для обнаружения дефектов показали, что такие технологии еще в большей степени зависят от условий окружающей среды и локального законодательства, запрещающего использование мощных излучателей, в то время как ультразвуковые технологии не позволяют добиться высокой вероятности обнаружения дефекта [16].

С развитием мобильных технологий и повсеместным распространением смартфонов популярность набрали подходы, основанные на анализе данных, полученных от встроенных в телефон устройств [17]. С ростом количества получаемых данных развивались методологические аспекты применения краудсорсинга [18, 19] и больших данных [20, 21]. В статье [22] представлено исследование по обнаружению аномалий дорожного покрытия с использованием датчиков смартфонов. Предложенный подход использует для анализа искусственные нейронные сети в задаче обнаружения выбоин в тротуарах. В работе [23] предлагается способ мониторинга состояния дорожного покрытия на основе данных мобильных телефонов, закрепленных на мотоциклах, которые являются наиболее чувствительным видом транспорта к качеству дорожного покрытия. Результаты исследований подтвердили обнаружение различных дорожных аномалий с вероятностью 0,62.

Невозможность проведения регулярных измерений, например из-за погодных условий или при сбоях в передаче данных с мобильных устройств, может приводить к пропускам в измеряемой информации. Пропуски измерений, а при ограничениях возможностей датчиков – еще и погрешности датирования, приводят к смещению временных меток от регулярных, тем самым образуя неэквилидистантные временные ряды измерительной информации. В статьях [24, 25] предложены алгоритмы вейвлет-преобразования неэквилидистантных временных рядов, обеспечивающие сокращение негативного влияния пропусков на результаты измерений. В работе [26] предложены способы применения вейвлет-преобразований в анализе транспортных потоков и показана эффективность вейвлетов в анализе скрытых закономерностей.

Алгоритмы машинного обучения и нейронные сети успешно применяются для обнаружения и классификации аномалий на дорогах. Например, в [27] предлагается метод для обработки больших данных, полученных со смартфонов и изображений, а в [28] предлагается использование глубоких сверточных нейронных сетей для определения наличия трещин в дорожном покрытии по изображениям. Кроме того, эффективность применения нейрон-

ных сетей в сочетании с предварительным вейвлет-преобразованием для обнаружения и классификации дорожных дефектов показана в [29].

Таким образом, целью данной работы является повышение вероятности обнаружения поверхностных дефектов автомобильных дорог в условиях наличия пропусков в исходных данных, для чего предлагается использование постобработки измерительной информации, а именно вейвлет-преобразование неэквидистантных временных рядов с последующим интеллектуальным анализом на основе нейросети с глубоким машинным обучением.

## 1. Описание подхода

Обнаружение поверхностных дефектов в целях проведения диагностики состояния покрытия автомобильных дорог выполняется на основе данных, передаваемых мобильными устройствами, закрепленными в движущемся транспортном средстве. Используя теоретико-множественный подход, сформируем описание поверхностного дефекта дорожного покрытия. Результатом проведения обследования выступит множество дефектов дорожного покрытия  $H$ . Представим каждый дорожный дефект  $h \in H$  тройкой:

$$h = \langle c, d, t^* \rangle, \quad (1)$$

где  $c \in C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  – вид дефекта покрытия из перечня  $C$ ;  $d$  – дескриптор дефекта;  $t^*$  – дата и время фиксации дефекта в формате UTC.

Перечень дефектов покрытия  $C$  может быть определен отраслевым дорожным методическим документом, регламентирующим деятельность по содержанию улиц или автодорог в районе проведения обследования.

Дескриптор каждого дорожного дефекта определяется местом его расположения и геометрическими характеристиками:

$$d = \langle Lg, Lt, S_{length}, S_{depth} \rangle, \quad (2)$$

где  $Lg$  – долгота в системе координат WGS-84;  $Lt$  – широта в системе координат WGS-84;  $S_{length}$  – протяженность дефекта;  $S_{depth}$  – глубина дефекта.

Интегрированные в мобильные устройства датчики не позволяют получить такие характеристики, как, например, ширину или площадь дефекта, поэтому они не рассматриваются в настоящей работе. Таким образом, необходимо обеспечить задание свойств, определяющих дефект покрытия, для чего предлагается следующий подход (рис. 1).

**Акселерометр** обеспечивает измерение сигналов ускорения по трем каналам (обозначены  $x_i \in X$ ,  $y_i \in Y$ ,  $z_i \in Z$ ) с частотой опроса  $\Delta t$  в дискретный момент времени  $i$ . Кроме этого, акселерометр преобразует сигналы ускорения в мгновенную скорость  $v_i$ . В общем случае  $\Delta t = \text{const}$ . В связи с нестабильностью работы датчиков возможны случаи, в которых происходит сбой проведения измерения, т.е. интервал между измерениями

$$t_{i+1} - t_i = k\Delta t, \quad (3)$$

где  $k \in N^* = \{1, 2, \dots\}$  – случайное натуральное число.

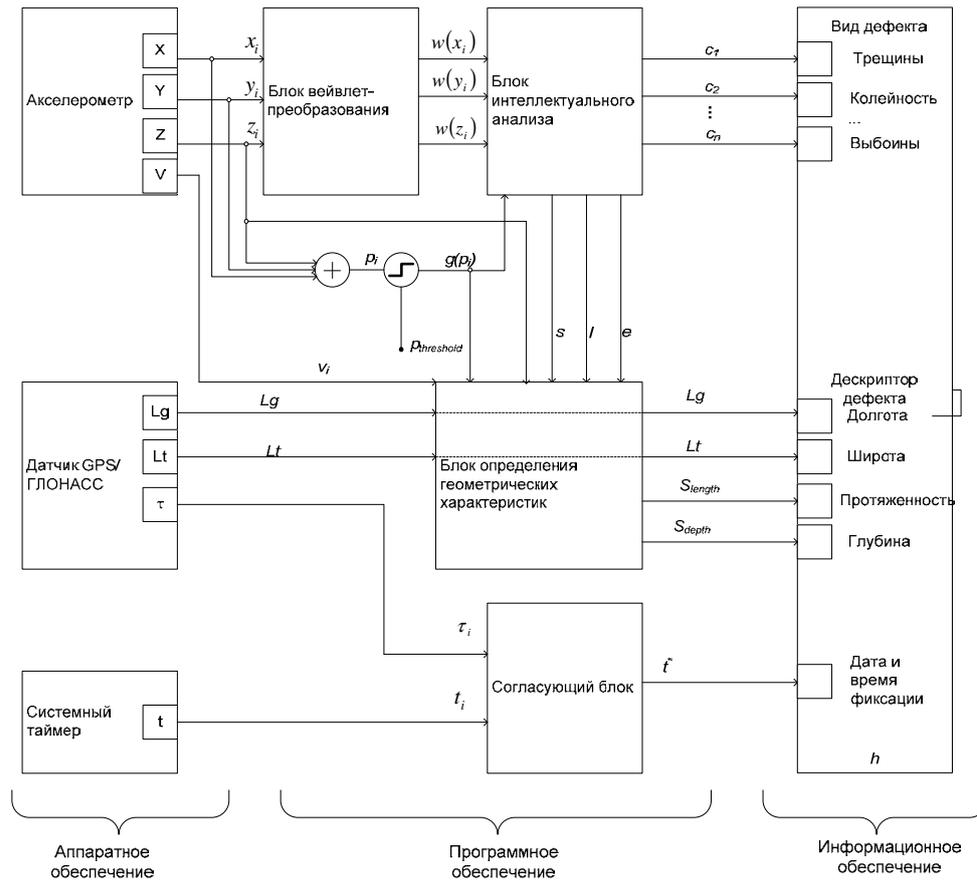


Рис 1. Формирование дескриптора дефекта покрытия

Для формирования **порогового фильтра** используется следующая метрика определения граничных условий аномалий:

$$P_i = |x_{i+1} - x_i| + |y_{i+1} - y_i| + |z_{i+1} - z_i|. \quad (4)$$

Пороговый фильтр срабатывает при выполнении следующего простого условия:

$$P_i \geq P_{\text{threshold}}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{threshold}}$  – чувствительность, которая определяется эмпирическим путем.

**Блок вейвлет-преобразования** основан на подходе, предложенном в [24, 25], при котором рассчитывается вейвлет-спектр:

$$w_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_i x_i \psi\left(\frac{t_i - b}{a}\right), \quad (6)$$

где  $a$  – параметр масштаба;  $b$  – параметр смещения;  $\psi(t)$  – соответствующий вейвлет;  $x_i$  – значение исходного сигнала в момент времени  $t_i$ .

**Согласующий блок** формирует результирующую метку даты и времени фиксации дефекта покрытия  $t^*$  в формате времени UTC:

$$t^* = \tau_i - f_{shift}(t_i), \quad (7)$$

где  $\tau_i$  – временная метка GPS/ГЛОНАСС-приемника в формате GPST;  $t_i$  – временная метка системного таймера;  $f_{shift}(t_i)$  – функция, определяющая сдвиг времени GPST от UTC в указанный момент времени  $t_i$ .

Необходимость наличия согласующего блока обусловлена особенностями временной метки GPS/ГЛОНАСС-приемника, фиксирующей время в формате GPST, определяемое по шкале непрерывного времени с игнорированием скачков секунд, т.е. время GPST отличается от UTC на целое число секунд.

**Интеллектуальный блок** формирует на основе искусственной нейросети вид дефекта, т.е. режим работы нейросети – классификация. Входными параметрами выступают вейвлет-спектры отдельно по каждому каналу  $w(x_i)$ ,  $w(y_i)$ ,  $w(z_i)$  и единичная функция ступенчатого фильтра:

$$g(p_i) = \begin{cases} 1, & p_i \geq p_{threshold}; \\ 0, & p_i < p_{threshold}. \end{cases} \quad (8)$$

Выходные параметры – принадлежность дефекта к указанному виду дефекта покрытия  $c_i \in C$ .

Вторая задача интеллектуального блока – формирование временных меток передней  $t_s$  и задней  $t_e$  кромок дефекта, точки касания поверхности  $t_l$ . Формирование меток происходит по границам скачков спектральной плотности в случае наличия зафиксированного нейросетью дефекта.

**Блок определения геометрических характеристик** транслирует долготу  $Lg$  и широту  $Lt$ , поступающую от GPS/ГЛОНАСС-приемника, без изменений; данные, поступающие от блока интеллектуального анализа, проходят обработку для определения протяженности  $S_{length}$  и глубины  $S_{depth}$  дефекта покрытия:

$$S_{length} = \sum_{i=s}^e v_i \times (t_{i+1} - t_i), \quad (9)$$

$$S_{depth} = z_i \times (t_l - t_s)^2 / 2, \quad (10)$$

где  $v_i$  – мгновенная скорость в момент времени  $t_i$ ;  $z_i$  – ускорение по каналу  $Z$  в момент времени  $t_i$ ;  $s$ ,  $e$  – номера отсчетов времени фиксации передней  $t_s$  и задней  $t_e$  кромок дефекта;  $l$  – номер отсчета времени фиксации касания поверхности дефекта  $t_l$ .

## 2. Система диагностики состояния покрытия

Синтезируемая система диагностики состояния покрытия автомобильных дорог строится на трех уровнях (рис. 1). Уровень аппаратного обеспече-

ния включает системный таймер устройства, встроенные в устройство акселерометр и GPS/ГЛОНАСС-приемник. На уровне программного обеспечения реализуются блоки вейвлет-преобразования и интеллектуального анализа, блок определения геометрических характеристик и согласующий блок. На уровне информационного обеспечения фиксируется массив информации о дефектах дорожного покрытия.

Архитектура системы включает в себя клиентские приложения, сервер приложений и сервер баз данных.

Разработанное клиентское приложение для сбора данных функционирует на мобильном устройстве пользователя под управлением операционной системы Android. Приложение обеспечивает опрос датчиков, накопление массивов информации и передачу их на сервер приложений по мере накопления или при подключении к сети Интернет.

Клиентское приложение для просмотра результатов реализовано как веб-приложение, обеспечивающее просмотр данных обследований на электронной карте и формирование дефектных ведомостей.

Сервер приложений реализует непосредственно обработку данных. Блоки вейвлет-преобразования и определения геометрических характеристик, согласующий блок построены на технологии .NET. Блок интеллектуального анализа реализован на Python. Обучение нейронной сети проведено на сформированном банке дорожных данных, содержащем как городские, так и загородные улицы, общей протяженностью 1150 км [30].

Сервер баз данных реализуется с использованием системы управления базами данных PostgreSQL/PostGIS.

### 3. Результаты

С целью удешевления процесса диагностики дорожного покрытия и обнаружения поверхностных дефектов в настоящей работе рассматривается использование датчиков, установленных в типичных мобильных устройствах: акселерометр, предназначенный для определения наличия поверхностного дефекта, и датчик GPS/ГЛОНАСС, необходимый для регистрации обнаруженного дефекта в привязке к пространству в системе координат WGS-84.

Экспериментальная апробация предлагаемого решения проведена для двух участков транспортной сети (рис. 2, 3), различных по своим характеристикам с точки зрения скоростного режима и наличия дефектов покрытия. Характеристики передвижения дорожной лаборатории с закрепленным мобильным устройством при прохождении участков приведены в табл. 1. В результате обработки записей, выполненных при обследовании указанных участков, получены следующие исходные данные, представленные на рис. 4 и 5.

Таблица 1

Характеристики движения лаборатории по участкам автодорог

Название	Время в пути, мин	Пройденный путь, км	Средняя скорость, км/ч
Участок № 1 (Ульяновская обл.)	35,7	49,3	82,8
Участок № 2 (г. Оренбург)	43,1	16,6	23,1

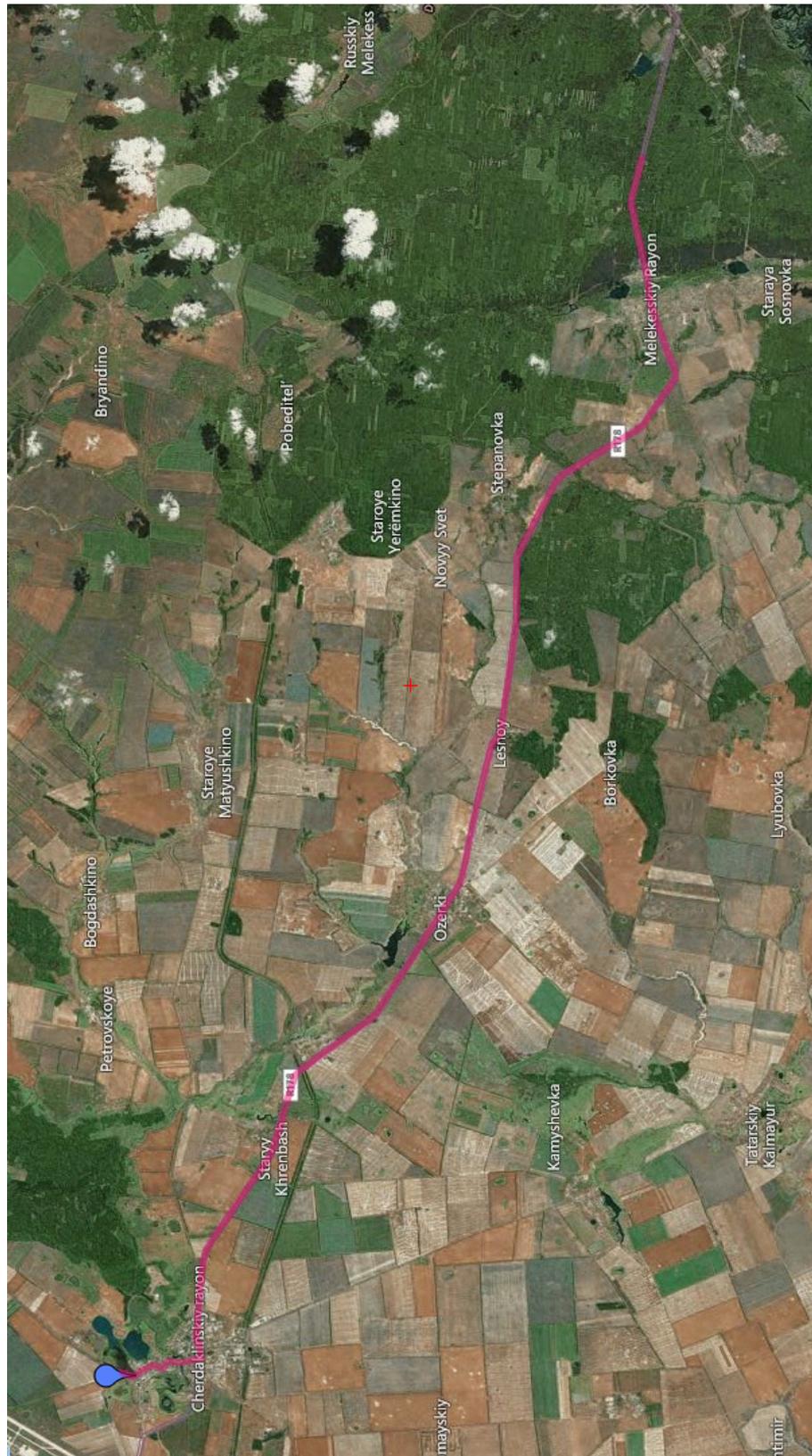


Рис. 2. Участок автодороги № 1 (загородная автограсса)

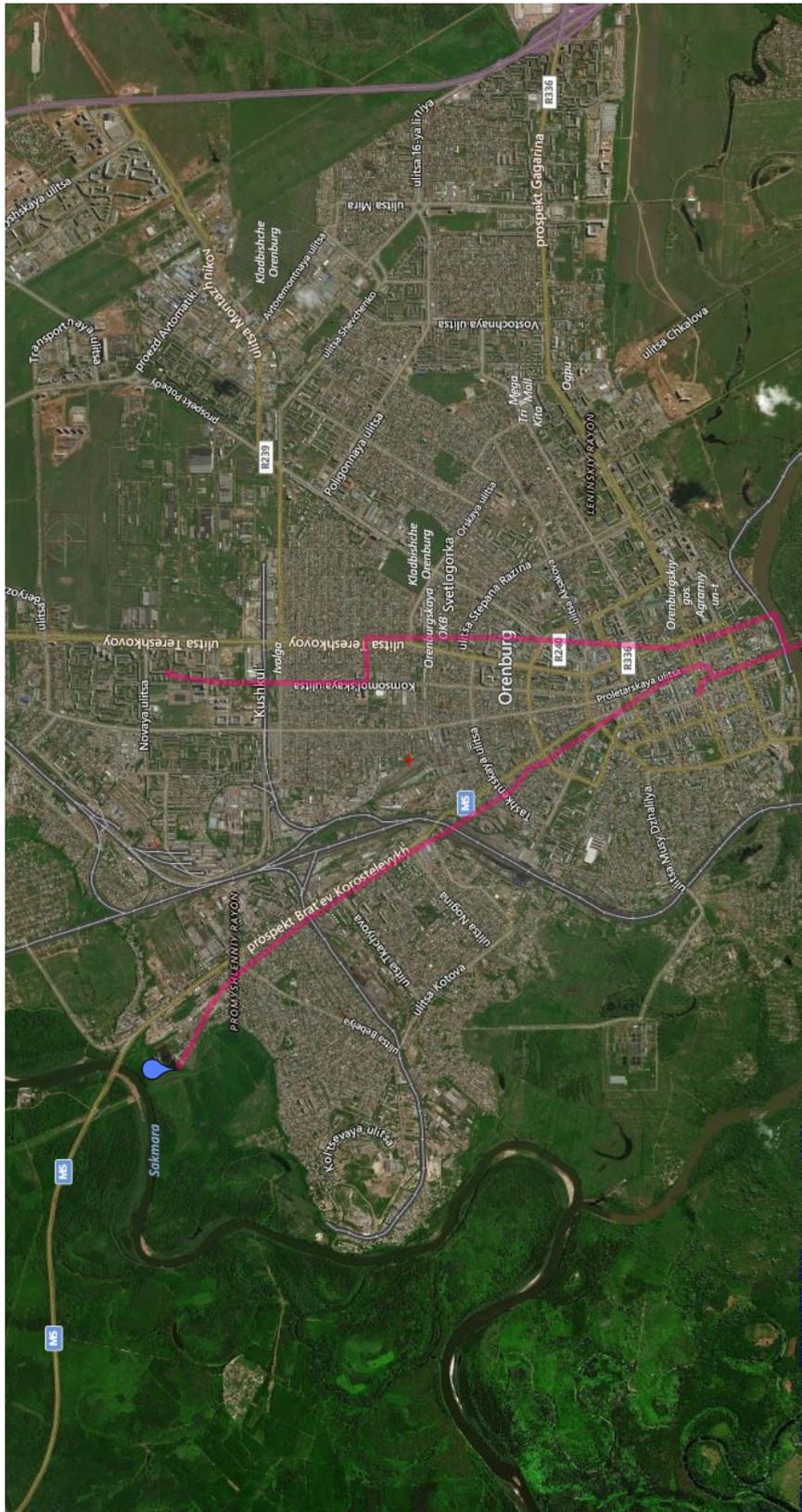


Рис. 3. Участок автодороги № 2 (городские улицы)

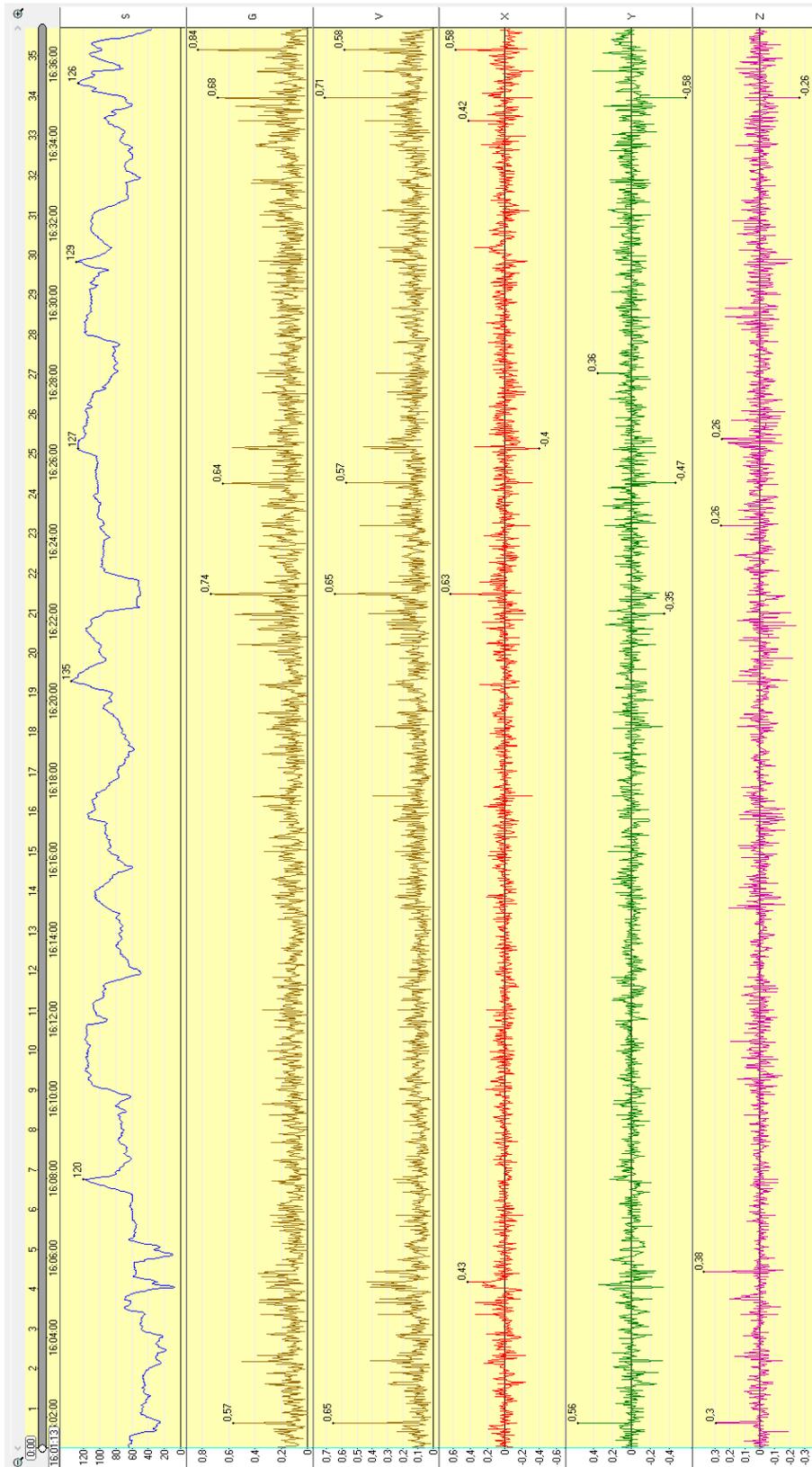


Рис. 4. Участок автодороги № 1 (загородная автотрасса)

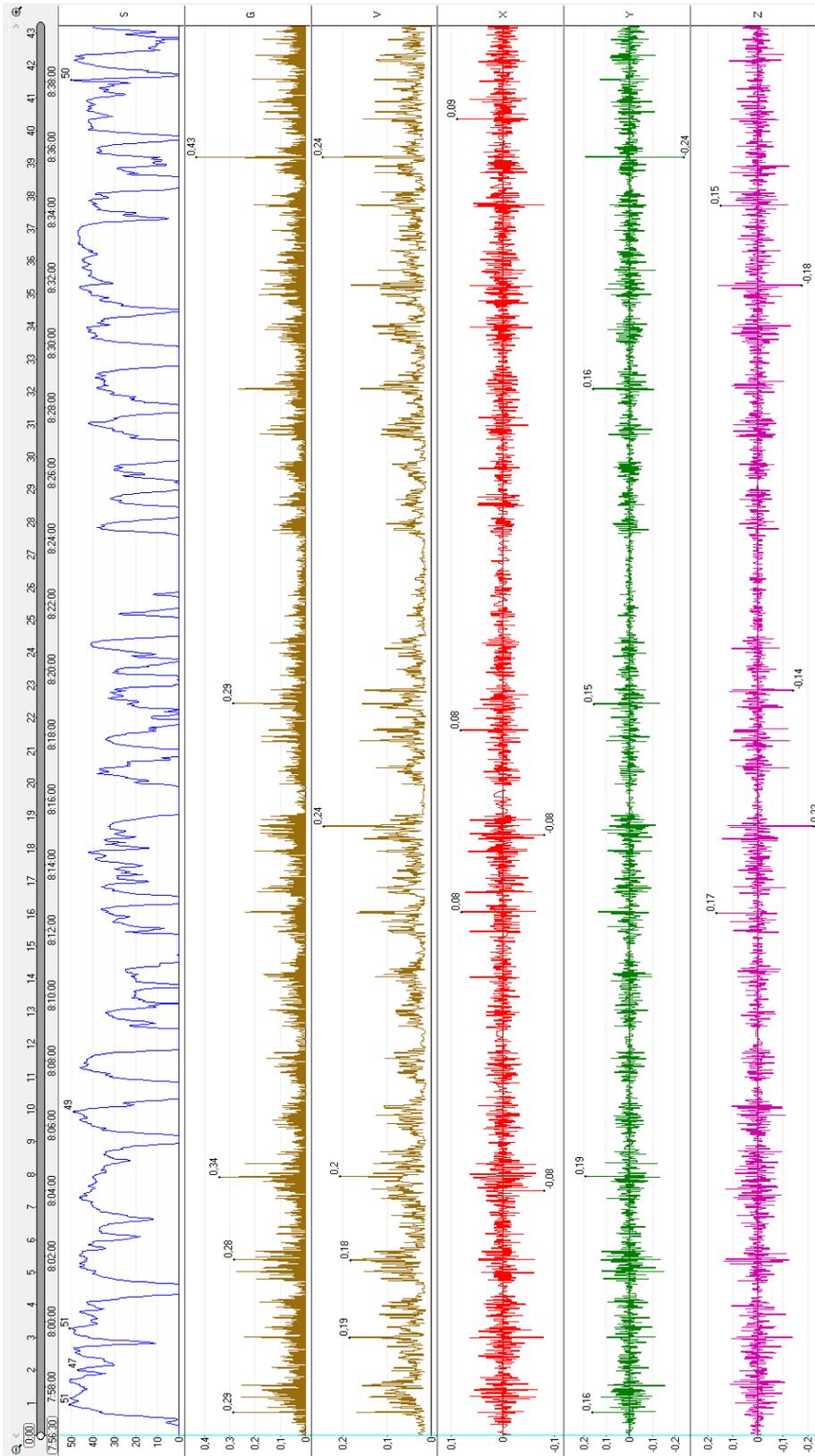


Рис. 5. Участок автодороги № 2 (городские улицы)

Помимо ускорений по осям акселерометра (обозначены  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) и результирующего вектора ускорения  $V$ , осуществляется запись таких параметров, как скорость движения лаборатории  $S$  и срабатывания датчика ударов  $G$ , позволяющих точнее интерпретировать полученные результаты.

Полученные в результате обработки вейвлет-спектры для участка автодороги № 1 (загородная автотрасса) приведены на рис. 6–8.

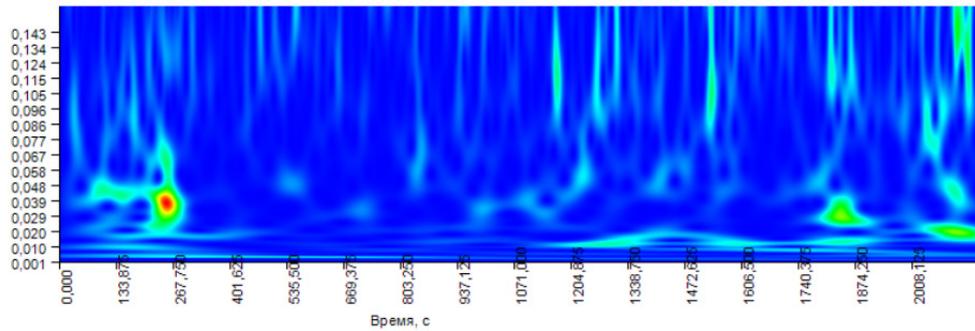


Рис. 6. Вейвлет-спектр для ряда значений ускорений по осям акселерометра  $X$  (загородная автотрасса)

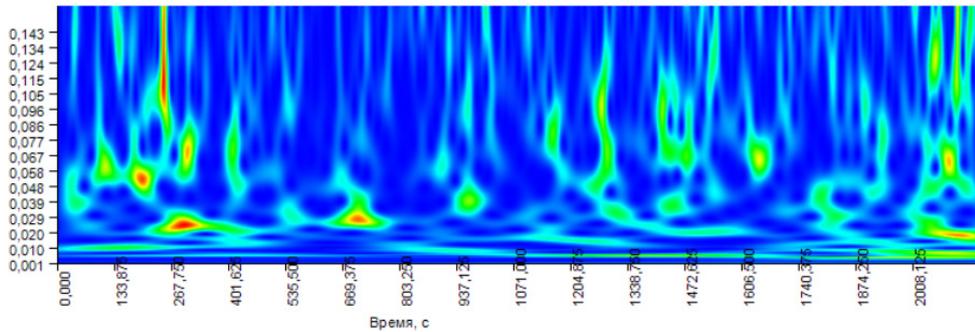


Рис. 7. Вейвлет-спектр для ряда значений ускорений по осям акселерометра  $Y$  (загородная автотрасса)

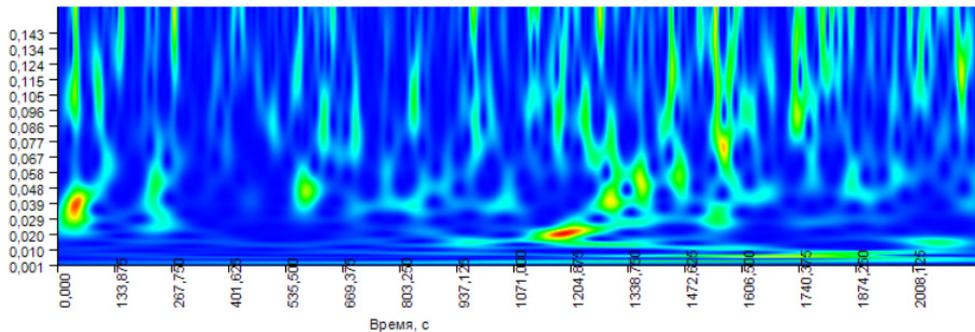


Рис. 8. Вейвлет-спектр для ряда значений ускорений по осям акселерометра  $Z$  (загородная автотрасса)

Полученные в результате обработки вейвлет-спектры для участка автодороги № 2 (городские улицы) приведены на рис. 9–11.

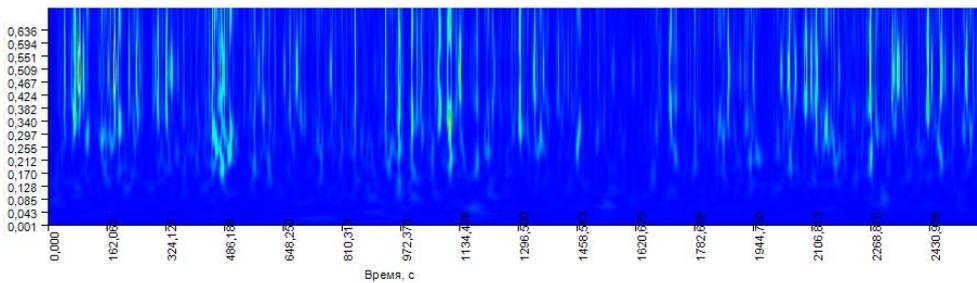


Рис. 9. Вейвлет-спектр для ряда значений ускорений по осям акселерометра X (городские улицы)

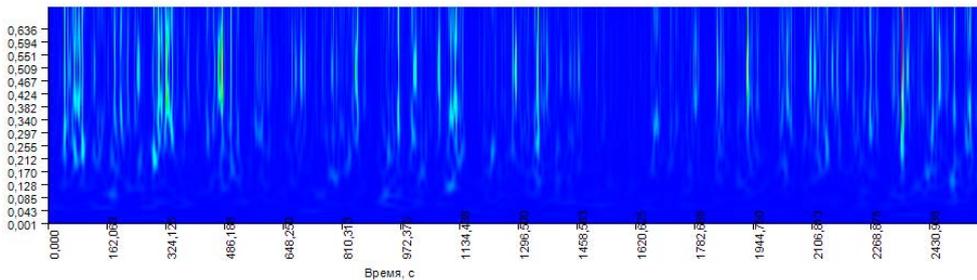


Рис. 10. Вейвлет-спектр для ряда значений ускорений по осям акселерометра Y (городские улицы)

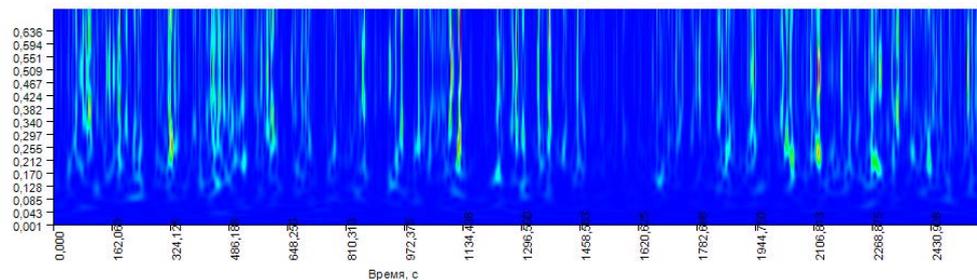


Рис. 11. Вейвлет-спектр для ряда значений ускорений по осям акселерометра Z (городские улицы)

Полученные данные поступают на вход блока интеллектуального анализа. В результате сопоставления дефектов, распознанных обученной нейронной сетью, и дефектов, присутствующих в дефектной ведомости, построенной специалистом, получены следующие данные (табл. 2).

Таким образом, полученные результаты по вероятности обнаружения дефектов составили: для участка № 1 – 0,95, а для участка № 2 – 0,94. В сравнении с аналогом [23], использующим данные акселерометров мобильных устройств, достигнуты высокие результаты: так, в [23] при анализе данных акселерометра достигнута вероятность обнаружения дефектов 0,62. Ресурсоемкие решения, основанные на анализе фото- и видеоизображений дефектов, предложенные в [10, 29], обеспечили вероятность обнаружения 0,80 и 0,95 соответственно, таким образом, предложенный подход не уступает им.

Результаты работы блока интеллектуального анализа

Название	Количество дефектов		Ложно-положительные срабатывания	Ложно-отрицательные срабатывания
	Дефектная ведомость	Блок интеллектуального анализа		
Участок № 1 (Ульяновская область)	75	71	3	1
Участок № 2 (г. Оренбург)	34	32	1	1

### Заключение

В статье предложен подход для повышения вероятности обнаружения поверхностных дефектов автомобильных дорог в условиях наличия пропусков в исходных данных путем внедрения постобработки измерительной информации, поступающей с датчиков мобильных устройств. Подход основан на последовательном применении вейвлет-преобразования и интеллектуального нейросетевого анализа с глубоким машинным обучением. Синтезирована система диагностики состояния покрытия автомобильных дорог, основанная на предложенном подходе. Проведена экспериментальная апробация системы на примере двух различных участков улично-дорожной сети. Результаты исследования показали, что вероятность распознавания дефектов дорожного покрытия составила 0,95.

Использование акселерометра мобильного устройства обладает такими достоинствами, как доступность и дешевизна, на которые направлены современные тенденции, но, тем не менее, не лишено недостатков:

– в условиях плотной городской застройки не всегда доступен сигнал GPS/ГЛОНАСС, что приводит к невозможности осуществить геопривязку дефекта;

– поскольку действие акселерометра основано на измерении ускорения, то из-за отсутствия ускорения при незначительных дефектах дорожного покрытия показания акселерометра имеют большую погрешность;

– мобильное устройство может быть случайно задето, что ведет к появлению ложных выбросов, которые могут быть нивелированы с помощью порогового фильтра или технологий краудсорсинга.

### Библиографический список

1. Головнин, О. К. Системный анализ и моделирование объектов, процессов и явлений транспортной инфраструктуры в технических системах управления движением / О. К. Головнин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 6-2. – С. 301–310.
2. Urano, K. Road surface condition inspection using a laser scanner mounted on an autonomous driving car / K. Urano, K. Hiroi, S. Kato, N. Komagata, N. Kawaguchi // IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). – IEEE, 2019. – С. 826–831.
3. Development of a laboratory model for automated road defect detection / H. Bello-Salau, A. M. Aibinu, E. N. Onwuka, J. J. Dukiya, A. J. Onumanyi, A. O. Ighabon // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC). – 2016. – Т. 8, № 9. – С. 97–101.

4. **Struțu, M. I.** Accelerometer Based Road Defects Identification System / M. I. Struțu, D. Popescu // U.P.B. Sci. Bull., Series C. – 2014. – Vol. 76, iss. 3. – С. 1–8.
5. **Radopoulou, S. C.** Automated detection of multiple pavement defects / S. C. Radopoulou, I. Brilakis // Journal of Computing in Civil Engineering. – 2017. – Vol. 31, № 2. – С. 04016057.
6. **Christodoulou, S. E.** Pavement defects detection and classification using smartphone-based vibration and video signals / S. E. Christodoulou, G. M. Hadjidemetriou, C. Kyriakou // Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering. – Cham, Springer, 2018. – С. 125–138.
7. **Moy de Vitry, M.** Sewer inlet localization in uav image clouds: Improving performance with multiview detection / M. Moy de Vitry, K. Schindler, J. Rieckermann, J. P. Leitão // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, № 5. – С. 706.
8. **Михеева, Т. И.** Метод синтеза тематического слоя объектов транспортной сети на основе материалов космической съемки / Т. И. Михеева, А. А. Федосеев, С. В. Михеев, О. К. Головнин // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23, № 11. – С. 808–816.
9. **Coenen, T. B. J.** A review on automated pavement distress detection methods / T. B. J. Coenen, A. Golroo // Cogent Engineering. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 1374822.
10. **Hadjidemetriou, G. M.** Automated pavement patch detection and quantification using support vector machines / G. M. Hadjidemetriou, P. A. Vela, S. E. Christodoulou // Journal of Computing in Civil Engineering. – 2018. – Т. 32, № 1. – С. 04017073.
11. **Abou Chacra, D. B.** Fully automated road defect detection using street view images / D. B. Abou Chacra, J. S. Zelek // 14th Conference on Computer and Robot Vision (CRV). – IEEE, 2017. – С. 353–360.
12. **Gkovedarou, M.** Road Drainage System Localisation and Condition Data Capture / M. Gkovedarou, I. Brilakis // International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) Driving data-informed decision-making. – ICE Publishing, 2019. – С. 43–47.
13. **Huyan, J.** Illumination Compensation Model with k-Means Algorithm for Detection of Pavement Surface Cracks with Shadow / J. Huyan, W. Li, S. Tighe, R. Deng, S. Yan // Journal of Computing in Civil Engineering. – 2020. – Т. 34, № 1. – С. 04019049.
14. **Shi, Y.** Automatic road crack detection using random structured forests / Y. Shi, L. Cui, Z. Qi, F. Meng, Z. Chen // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2016. – Т. 17, № 12. – С. 3434–3445.
15. **Сидоров, А. В.** Программно-аппаратный комплекс учета параметров автодороги / А. В. Сидоров, О. К. Головнин // ИТ & ТРАНСПОРТ. – 2014. – С. 33–40.
16. **Цаль, А. Ю.** Совершенствование технических решений мониторинга автомобильных дорог и транспортных сооружений / А. Ю. Цаль, Н. А. Ермошин, П. О. Середа // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1 (48). – С. 16–22.
17. **Бочаров, Д. С.** Автоматизированная система оценки состояния дорожного покрытия с использованием устройств на платформе Android / Д. С. Бочаров, С. А. Прохоров // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2017. – № 5-5. – С. 29–34.
18. **Hosseini, M.** On the Configuration of Crowdsourcing Projects / M. Hosseini, K. Phalp, J. Taylor, R. Ali // Crowdsourcing: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. – IGI Global, 2019. – С. 33–52.
19. **Huang, Y.** Multidimensional reputation evaluation model for crowdsourcing participants based on big data / Y. Huang, M. Chen // International Conference on High Performance Big Data and Intelligent Systems (HPBD&IS). – IEEE, 2019. – С. 41–46.

20. Integration issues of Big Data analysis on social networks / A. V. Ivaschenko, N. Y. Ilyasova, A. A. Khorina, V. A. Isayko, D. N. Krupin, V. A. Bolotsky, P. V. Sitnikov // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Т. 2212. – С. 248–254.
21. **Dai, H. N.** Big data analytics for manufacturing internet of things: opportunities, challenges and enabling technologies / H. N. Dai, H. Wang, G. Xu, J. Wan, M. Imran // Enterprise Information Systems. – 2019. – С. 1–25.
22. **Kyriakou, C.** Smartphone-Based Pothole Detection Utilizing Artificial Neural Networks / C. Kyriakou, S. E. Christodoulou, L. Dimitriou // Journal of Infrastructure Systems. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 04019019.
23. **Manan, M.** (ROCOM)–System development, validation and field test / M. Manan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 512, № 1. – С. 012017.
24. **Прохоров, С. А.** Программный комплекс анализа неэквидистантных временных рядов на основе непрерывного вейвлет-преобразования / С. А. Прохоров, А. А. Столбова // Программные продукты и системы. – 2017. – Т. 30, № 4. – С. 668.
25. **Столбова, А. А.** Разработка и программная реализация алгоритмов непрерывного вейвлет-преобразования временных рядов с регулярной дискретизацией / А. А. Столбова // Программные продукты и системы. – 2017. – Т. 30, № 4. – С. 765–769.
26. **Головнин, О. К.** Вейвлет-анализ как инструмент исследования характеристик дорожного движения для интеллектуальных транспортных систем в условиях недостающих данных / О. К. Головнин, А. А. Столбова // Труды СПИИРАН. – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 326–353.
27. **Christodoulou, S. E.** Pavement Patch Defects Detection and Classification Using Smartphones, Vibration Signals and Video Images / S. E. Christodoulou, C. Kyriakou, G. Hadjidemetriou // Mobility Patterns, Big Data and Transport Analytics. – Elsevier, 2019. – С. 365–380.
28. Road crack detection using deep convolutional neural network and adaptive thresholding / R. Fan, M. J. Bocus, Y. Zhu, J. Jiao, L. Wang, F. Ma, M. Liu // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – IEEE, 2019. – С. 474–479.
29. **Ht, M.** Detection and Classification of Potholes in Indian Roads Using Wavelet Based Energy Modules / M. Ht, A. Danti // International Conference on Data Science and Communication (IconDSC). – IEEE, 2019. – С. 1–7.
30. Банк дорожных данных. – URL: <http://gisabris.ru>.

### **References**

1. Golovnin O. K. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2018, vol. 20, no. 6-2, pp. 301–310. [In Russian]
2. Urano K., Hiroi K., Kato S., Komagata N., Kawaguchi N. *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Work-shops (PerCom Workshops)*. IEEE, 2019, pp. 826–831.
3. Bello-Salau H., Aibinu A. M., Onwuka E. N., Dukiya J. J., Onumanyi A. J., Ighabon A. O. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*. 2016, vol. 8, no. 9, pp. 97–101.
4. Struțu M. I., Popescu D. *U.P.B. Sci. Bull., Series C*. 2014, vol. 76, iss. 3, pp. 1–8.
5. Radopoulou S. C., Brilakis I. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2017, vol. 31, no. 2, p. 04016057.
6. Christodoulou S. E., Hadjidemetriou G. M., Kyriakou C. *Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering*. Cham, Springer, 2018, pp. 125–138.

7. Moy de Vitry M., Schindler K., Rieckermann J., Leitão J. P. *Remote Sensing*. 2018, vol. 10, no. 5, p. 706.
8. Mikheeva T. I., Fedoseev A. A., Mikheev S. V., Golovnin O. K. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technology]. 2017, vol. 23, no. 11, pp. 808–816. [In Russian]
9. Coenen T. B. J., Golroo A. *Cogent Engineering*. 2017, vol. 4, no. 1, p. 1374822.
10. Hadjidemetriou G. M., Vela P. A., Christodoulou S. E. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2018, vol. 32, no. 1, p. 04017073.
11. Abou Chacra D. B., Zelek J. S. *14th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*. IEEE, 2017, pp. 353–360.
12. Gkovedarou M., Brilakis I. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) Driving data-informed decision-making*. ICE Publishing, 2019, pp. 43–47.
13. Huyan J., Li W., Tighe S., Deng R., Yan S. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2020, vol. 34, no. 1, p. 04019049.
14. Shi Y., Cui L., Qi Z., Meng F., Chen Z. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016, vol. 17, no. 12, pp. 3434–3445.
15. Sidorov A. V., Golovnin O. K. *IT & TRANSPORT*. 2014, pp. 33–40.
16. Tsal' A. Yu., Ermoshin N. A., Sereda P. O. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Don's engineering bulletin]. 2018, no. 1 (48), pp. 16–22. [In Russian]
17. Bocharov D. S., Prokhorov S. A. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire* [Actual scientific research in the modern world]. 2017, no. 5-5, pp. 29–34. [In Russian]
18. Hosseini M., Phalp K., Taylor J., Ali R. *Crowdsourcing: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. IGI Global, 2019, pp. 33–52.
19. Huang Y., Chen M. *International Conference on High Performance Big Data and Intelligent Systems (HPBD&IS)*. IEEE, 2019, pp. 41–46.
20. Ivaschenko A. V., Ilyasova N. Y., Khorina A. A., Isayko V. A., Krupin D. N., Bolotsky V. A., Sitnikov P. V. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018, vol. 2212, pp. 248–254.
21. Dai H. N., Wang H., Xu G., Wan J., Imran M. *Enterprise Information Systems*. 2019, pp. 1–25.
22. Kyriakou C., Christodoulou S. E., Dimitriou L. *Journal of Infrastructure Systems*. 2019, vol. 25, no. 3, p. 04019019.
23. Manan M. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019, vol. 512, no. 1, p. 012017.
24. Prokhorov S. A., Stolbova A. A. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. 2017, vol. 30, no. 4, p. 668. [In Russian]
25. Stolbova A. A. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. 2017, vol. 30, no. 4, pp. 765–769. [In Russian]
26. Golovnin O. K., Stolbova A. A. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences]. 2019, vol. 18, no. 2, pp. 326–353. [In Russian]
27. Christodoulou S. E., Kyriakou C., Hadjidemetriou G. *Mobility Patterns, Big Data and Transport Analytics*. Elsevier, 2019, pp. 365–380.
28. Fan R., Bocus M. J., Zhu Y., Jiao J., Wang L., Ma F., Liu M. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2019, pp. 474–479.
29. Ht M., Danti A. *International Conference on Data Science and Communication (IconDSC)*. IEEE, 2019, pp. 1–7.
30. *Bank dorozhnykh dannykh* [Road data bank]. Available at: <http://gisabris.ru>. [In Russian]

***Головнин Олег Константинович***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационных систем  
и технологий, Самарский национальный  
исследовательский университет имени  
академика С. П. Королева (Россия,  
г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

E-mail: golovnin@bk.ru

***Golovnin Oleg Konstantinovich***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of information  
systems and technologies, Samara  
National Research University  
(34 Moskovskoe shosse street,  
Samara, Russia)

***Прохоров Сергей Антонович***

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационных  
систем и технологий, Самарский  
национальный исследовательский  
университет имени академика  
С. П. Королева (Россия, г. Самара,  
ул. Московское шоссе, 34)

E-mail: sp.prokhorov@gmail.com

***Prokhorov Sergey Antonovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of the sub-department of information  
systems and technologies, Samara  
National Research University  
(34 Moskovskoe shosse street,  
Samara, Russia)

***Столбова Анастасия Александровна***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационных систем  
и технологий, Самарский национальный  
исследовательский университет имени  
академика С. П. Королева (Россия,  
г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

E-mail: anastasiya.stolbova@bk.ru

***Stolbova Anastasiya Aleksandrovna***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of information  
systems and technologies, Samara  
National Research University  
(34 Moskovskoe shosse street,  
Samara, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Головнин, О. К. Обработка временных рядов измерительной информации на основе интеллектуального анализа вейвлет-спектров в системах диагностики состояния покрытия автомобильных дорог при обнаружении поверхностных дефектов / О. К. Головнин, С. А. Прохоров, А. А. Столбова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 47–64. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-5.

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ МОБИЛЬНЫХ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* На современном уровне организации распределенных вычислительных систем необходимо учитывать мобильность компонент – вычислительных узлов, размещенных на мобильных платформах, и модулей программного обеспечения в форме мобильных агентов. Актуальной и сложной является проблема организации взаимодействий компонент в виртуализированных облачно-сетевых РВС (ОС РВС), программное обеспечение которых базируется на платформах мобильных и стационарных агентов, а аппаратное обеспечение включает стационарные и мобильные вычислительные узлы. Объектом исследования является функциональная архитектура ОС РВС. Предметом исследования является методика построения концептуальной модели распределенных вычислений в ОС РВС. Целью исследования является создание простой концептуальной модели облачно-сетевых распределенных вычислительных систем, объединяющих в себе свойства собственно облачных и грид-систем со свойствами мультиагентных систем и пригодной для последующего создания программного обеспечения прикладного и промежуточного (*middleware*) уровней ОС РВС путем последовательной детализации концептуальной модели.

*Материалы и методы.* В процессе исследований выполняется построение модели сети многоагентных машин Тьюринга и разрабатываются формализованные спецификации узлов сети на основе теории сетей абстрактных модулей и исполнимых логико-алгебраических моделей.

*Результаты.* Предложена обобщенная концептуальная модель функциональной архитектуры агентно-ориентированной облачно-сетевой РВС с переменной структурой и мобильным программным обеспечением на базе сети многоагентных машин Тьюринга. Предложены новые унифицированные описания элементов концептуальной модели – детерминированных, недетерминированных и вероятностных машин Тьюринга с переменной конфигурацией на базе аппарата формализованных спецификаций – сетей абстрактных модулей.

*Выводы.* Предложена методика построения обобщенной концептуальной модели функциональной архитектуры агентно-ориентированной ОС РВС с переменной структурой и мобильным программным обеспечением на базе сети машин Тьюринга, позволяющая разработчику оценивать свойства и определять состав программного обеспечения РВС данного типа. Предполагается, что на практике такая модель пригодна также для реализации на ее основе прототипного программного обеспечения систем распределенной и параллельной символьной мультиобработки данных.

**Ключевые слова:** облачно-сетевые распределенные вычислительные системы, агенты, сервисы, мультиагентные системы, сети многоагентных машин Тьюринга, логико-алгебраические спецификации.

V. I. Volchikhin, S. A. Zinkin, N. S. Karamysheva

## CONCEPTUAL MODELS OF FUNCTIONAL ARCHITECTURE OF MOBILE RECONFIGURABLE AGENT-ORIENTED DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS

### **Abstract.**

*Background.* At the current level of organization of distributed computing systems (DCS), it is necessary to take into account the mobility of components - computing nodes located on mobile platforms and software modules in the form of mobile agents. The organizing of the interactions of components in virtualized cloud-network DCS (CN DCS), the software of which is based on the platforms of mobile and stationary agents, and the hardware includes stationary and mobile computing nodes, is an urgent and complex problem. The object of the research is the functional architecture of the CN DCS. The subject of the research is a methodology for constructing a conceptual model of distributed computing in CN DCS. The aim of the study is to create a simple conceptual model (CM) of CN DCS, combining the properties of cloud and grid systems with the properties of multi-agent systems and suitable for the subsequent creation of software for applied and middleware levels of CN DCS by sequential detailing of the CM.

*Materials and methods.* During the research process, a model of a network of multi-tape Turing machines has been built and formalized specifications of network nodes are developed based on the theory of networks of abstract modules and executable logical-algebraic models.

*Results.* A generalized conceptual model of the functional architecture of an agent-oriented cloud-network DCS with variable structure and mobile software based on a network of multi-tape Turing machines is proposed. The new unified descriptions of the elements of the conceptual model - deterministic, non-deterministic and probabilistic Turing machines with variable configuration based on the apparatus of formalized specifications - networks of abstract modules are proposed.

*Conclusions.* A method for constructing a generalized conceptual model of the functional architecture of an agent-based CN DCS with a variable structure and mobile software based on a network of Turing machines, which allows a developer to evaluate the properties and determine the composition of DCS software of this type is proposed. It is assumed that, in practice, such a model is also suitable for the implementation on its basis of prototype software for systems of distributed and parallel symbolic multiprocessing of data.

**Keywords:** cloud-network distributed computing systems, agents, services, multi-agent systems, networks of multi-tape Turing machines, logical-algebraic specifications.

### **Введение**

Организация распределенных вычислений при работе вычислительных систем как в замкнутом объеме беспроводных компьютерных сетей, так и при соединении в глобальную сеть удаленных локальных сетей нередко связана с необходимостью учета мобильности объектов – вычислительных узлов, размещенных на мобильных платформах и модулей программного обеспечения в форме мобильных агентов. Существуют несколько библиотек для раз-

работки мобильных агентов. Большинство таких библиотек разработаны на платформенно-независимом объектно-ориентированном языке Java, который предназначен в первую очередь для использования в Интернете, так как стандартная библиотека Java поддерживает известные протоколы и интерфейсы, используемые в различных сетях.

В международной практике получили применение ряд платформ для мобильных и стационарных агентов: Agent Factory, AgentBuilder, AgentScape, Aglets, AGLOBE, Cougar, CybelePro, EMERALD, JACK, JADE, Jadex, Jason, JIAC, Jas, MASON, SeSAм, Swarm и др. [1–5]. Агенты, разработанные в рамках данных платформ, разнообразны по целям и возможностям применения. Одними из наиболее развитых и апробированных платформ мобильных и интеллектуальных агентов являются платформы Aglets, JADE и Jason [6–14].

Обычно используется следующее определение: мобильные агенты – это программы, которые можно отправить с одного компьютера и доставить на удаленный компьютер для выполнения. По прибытии на удаленный компьютер они представляют свои учетные данные и получают доступ к локальным службам и данным. Они также предоставляют единую унифицированную парадигму для работы распределенных объектов, охватывающую синхронность и асинхронность, передачу сообщений и объектов, а также стационарные объекты и мобильные объекты. Мобильный агент имеет возможность перемещаться на любой доступный ему узел сети. При перемещении агент может перенести с собой все остальные объекты, связанные с ним в текущий момент времени, а также свое состояние, в котором он находился в момент отправки. При прибытии на место назначения мобильный агент восстанавливает свое состояние и продолжает свою работу, либо принимает собственное решение о дальнейших действиях. Мобильные агенты поддерживают также неустойчивые соединения, портативные компьютеры, периферийные устройства, мобильные средства связи [6–8, 12–14].

Мобильный агент создается в специальной серверной среде, поставляемой от разработчиков. Серверная среда или сервер агентов предоставляет базовые сервисы для управления агентами: создание, уничтожение, клонирование, отправка, деактивация, назначение и смена контекста (виртуального рабочего пространства). Сервер агентов также служит для управления глобальными политиками безопасности, правами доступа агентов к ресурсам и другим агентам, регистрацией агентов, правилами межконтекстных взаимодействий [14].

Все эти особенности делают использование технологии мобильных агентов привлекательным для работы в сетях. Данная технология позволяет проектировать и строить эффективные распределенные системы [9–11].

В работе [15] была предложена организация функционирования облачно-сетевых распределенных вычислительных систем (РВС), основанная на формализации перехода от известной облачной архитектуры «функция как сервис» (FaaS – Function-as-a-Service) к новой архитектуре «агент как сервис» (AaaS – Agent-as-a-Service). Однако, несмотря на достигнутый прогресс в области глобальных распределенных и агентно-ориентированных вычислений, технологии глобального программирования требуют дополнительного теоретического обоснования.

В настоящей работе предложена обобщенная концептуальная модель функциональной архитектуры РВС с переменной структурой и мобильным

агентно-ориентированным программным обеспечением на базе сети машин Тьюринга, позволяющая разработчику оценивать свойства и определять состав программного обеспечения РВС. На практике такая модель может быть пригодна для реализации на ее основе прототипного программного обеспечения вычислительных систем для распределенной и параллельной символьной мультиобработки данных.

Новое унифицированное описание на базе аппарата формализованных спецификаций – сетей абстрактных модулей, позволит специфицировать ряд математических абстракций: детерминированных, недетерминированных и вероятностных машин Тьюринга с переменной конфигурацией и, в дальнейшем, реконфигурируемых конечных автоматов различных видов: детерминированных, недетерминированных и вероятностных. Описание позволяет строить исполнимые модели функционирования распределенных вычислительных систем с переменной структурой, пригодные для создания элементов функциональной архитектуры распределенных вычислительных систем в виде прототипного и рабочего программного обеспечения промежуточного (*middleware*) уровня.

### **1. Концептуальная модель распределенных вычислений в глобальных вычислительных сетях**

Предлагается концептуальная модель распределенных вычислений (КМ РВ) в глобальных вычислительных сетях. Для определения близкой к КМ РВ модели коллектива вычислителей (МКВ) в связи с эквивалентностью различных алгоритмических систем, в работе [16] были выбраны машины Тьюринга. Предложенный в этой работе подход позволяет на концептуальном уровне рассмотреть системную и функциональную архитектуры однородных вычислительных систем, структур и сред. Этот же подход с существенными изменениями и дополнениями в настоящей работе предлагается использовать для построения концептуальной модели глобальных агентно-ориентированных вычислений в вычислительных сетях на основе сети многоклеточных машин Тьюринга.

Согласно описанию МКВ из работы [16] структурная схема коллектива вычислителей представлена в виде решетки, представляющей однородную вычислительную среду. Для машин Тьюринга, находящихся в узлах решетки, введены две специальные операции – передачи ( $\Pi_1$ ) и приема ( $\Pi_2$ ). Передающая машина Тьюринга, находящаяся в состоянии  $q_{\Pi_1}$ , передает обозреваемый головкой символ для записи в обозреваемые головками ячейки всех остальных машин, которые должны в данный момент выполнять операции приема, находясь в состояниях  $q_{\Pi_2}$ . Все машины Тьюринга ведут вычисления независимо друг от друга в соответствии со своими программами. Организация фазы управления основана на введенных ранее в теории однородных вычислительных систем операциях обобщенного условного ( $Y_0$ ) и безусловного ( $Y_1$ ) переходов.

Однако вычислительная среда, реализуемая на основе глобальной вычислительной сети, имеет чаще всего нерегулярную структуру из-за сложной системы коммуникаций, включающей каналы связи, коммутаторы, концентраторы, маршрутизаторы и другие устройства. Глобальные вычисления ча-

ще всего требуют организации логической связи всех вычислительных узлов по принципу «каждый с каждым». Особенно это важно для пиринговых [7] (рис. 1) и метакомпьютерных [9, 10] распределенных вычислительных систем, построенных на платформе мобильных агентов. При отсутствии непосредственных связей используются физические связи через промежуточные (транзитные) узлы, т.е. непосредственные логические связи устанавливаются как виртуальные соединения.

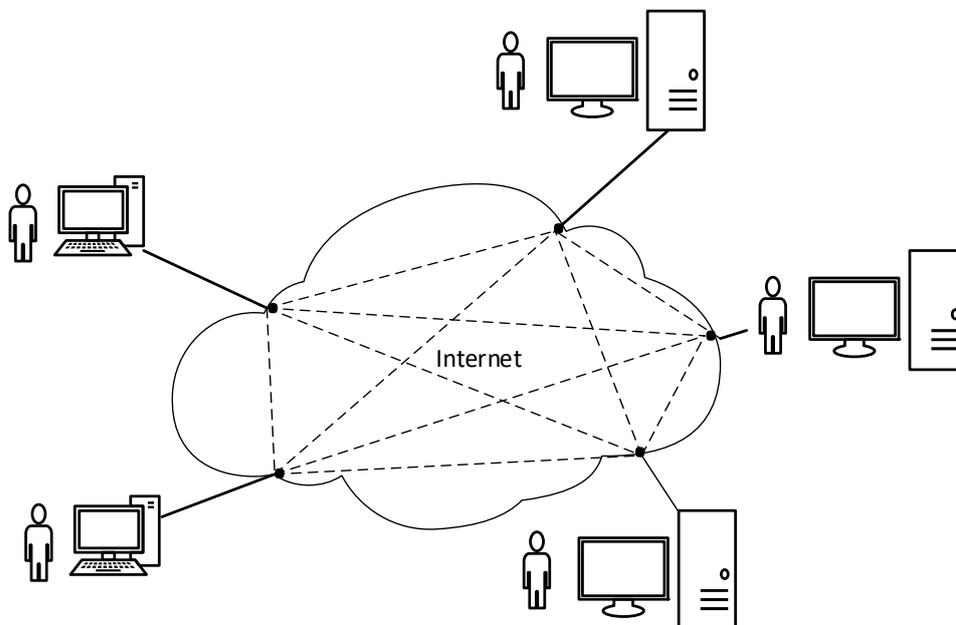


Рис. 1. Коммуникации в пиринговой (peer-to-peer) компьютерной сети

На абстрактном уровне детализацией этих связей можно пренебречь. Поэтому предлагаемая концептуальная модель распределенных вычислений в глобальных вычислительных сетях имеет следующие отличия от модели коллектива вычислителей из [16]: граф, связывающий машины Тьюринга, является полным ориентированным графом без петель. Тем самым будет учтена сетевая специфика модели: полный граф реализуется в логической сети, а машины Тьюринга реализуются на уровне распределенного приложения. Далее в новой модели сети машин Тьюринга доопределяются операции фаз обмена и получения результатов вычислений: вводятся операции, которые отсутствовали в прежней модели коллектива вычислителей. В новой модели машины Тьюринга, размещенные в узлах, являются многоленточными, а различные программы для различных лент и головок одной и той же машины выполняются последовательно. При необходимости может быть также установлен основной режим работы многоленточной машины Тьюринга, при котором согласно исходному определению [16] машина использует все ленты и головки, выполняя одну (свою) программу. Более подробное описание многоленточной машины Тьюринга будет дано далее.

Для описания некоторых из новых операций потребуется понятие о конфигурации многоленточной машины Тьюринга. Формальное определение

многоленточной машины Тьюринга приведено, например, в работе [17]. Для описания ряда новых операций для сети машин Тьюринга потребуется дополнительно использовать понятие о конфигурации этих машин из указанной работы:

«Конфигурация  $N$ -ленточной машины Тьюринга – это следующий кортеж:

$$(q, \alpha_1 \uparrow \beta_1, \alpha_2 \uparrow \beta_2, \dots, \alpha_i \uparrow \beta_i, \dots, \alpha_N \uparrow \beta_N),$$

где  $q$  – состояние управляющего устройства;  $\alpha_i \uparrow \beta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) – непустая часть  $i$ -й ленты;  $\uparrow$  – специальный символ, не являющийся символом ленты и указывающий, что  $i$ -я головка в данный момент обозревает ячейку, расположенную непосредственно справа от этого символа».

Структурная схема концептуальной модели глобальных вычислений представлена на рис. 2.

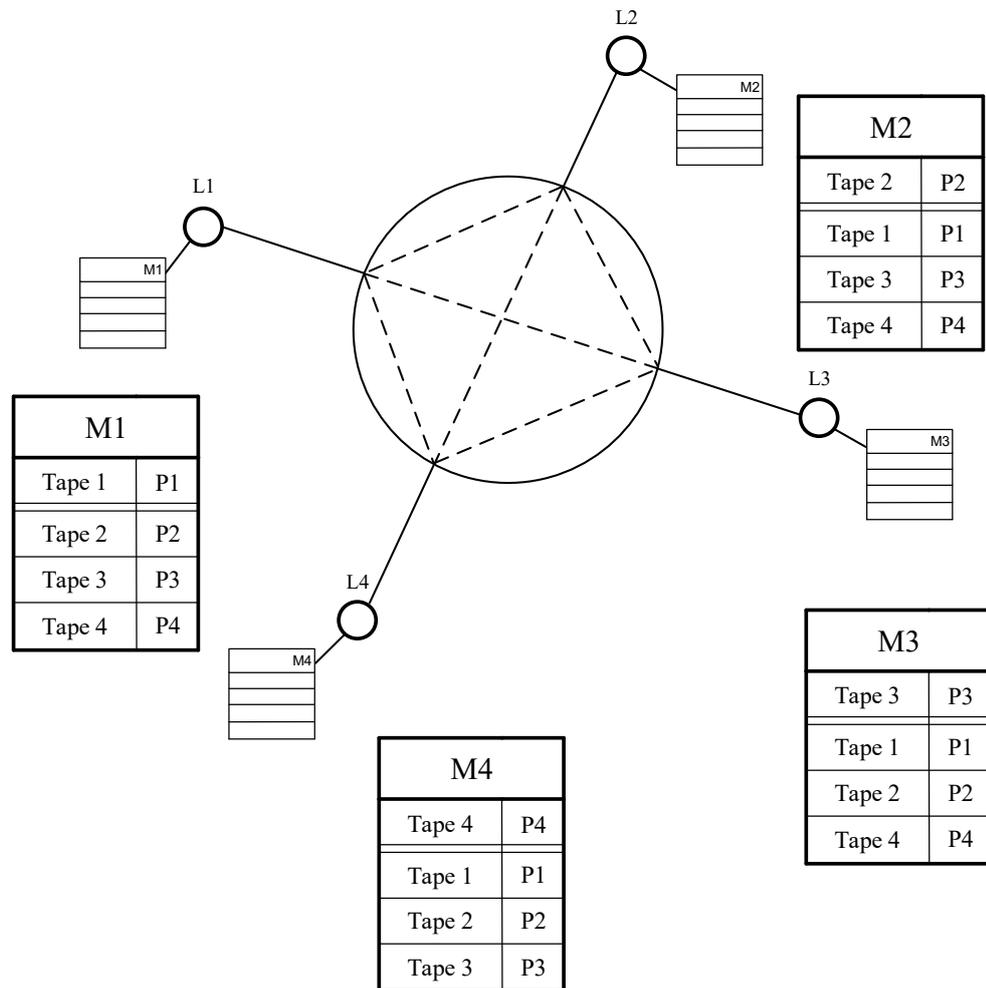


Рис. 2. Концептуальная модель распределенных вычислений в глобальной вычислительной сети, построенная на основе сети многоленточных машин Тьюринга

Здесь для простоты вместо двунаправленных дуг изображены пунктиром ребра полного неориентированного графа, образующие связи по принципу «каждый с каждым». Каждый  $i$ -й узел сети включает машину Тьюринга со считывающими-записывающими головками на собственной  $i$ -й ленте *Tape<sub>i</sub>* и на остальных дополнительных  $(N - 1)$  лентах. Дополнительные ленты используются для хранения копий содержимого лент смежных машин, а также могут иметь самостоятельное значение для узла. Абстрактное управляющее устройство каждой  $i$ -й машины Тьюринга имеет память для хранения программ  $P_1, P_2, \dots, P_N$ , в том числе собственной программы  $P_i$  и копий программ смежных машин. Расширенный набор сетевых операций обмена и управления (формирования результатов) в сети Тьюринга представлен в табл. 1.

Таблица 1

Сетевые операции обмена и управления  
в концептуальной модели распределенных вычислений  
на основе сети многоленточных машин Тьюринга

Глобальные операции	Комментарии
1	2
<i>Send-to-all</i>	Аналог операции $\Pi_1$ в МКВ: передающая машина Тьюринга (МТ), находясь в специальном состоянии $q_{Send-to-all}$ , передает обозреваемый головкой символ для записи в обозреваемые головками ячейки всех остальных машин
<i>Receive-from(i)</i>	Аналог операции $\Pi_2$ в МКВ: принимающая МТ, находясь в состоянии $q_{Receive-from(i)}$ , принимает символ от передающей $i$ -й машины и записывает его в обозреваемую ячейку
<i>Send-to(i)</i>	МТ, находясь в состоянии $q_{Send-to(i)}$ , передает обозреваемый головкой символ для записи его в обозреваемую ячейку машины $i$
<i>Send-tape-to-all</i>	Содержимое ленты МТ передается всем остальным машинам
<i>Send-tape-to(i)</i>	Содержимое ленты МТ передается $i$ -й машине
<i>Receive-tape-from(i)</i>	МТ принимает содержимое ленты от $i$ -й машины
<i>Send-data-to-all</i>	Содержимое части ленты (данные) МТ передается всем остальным машинам
<i>Send-data-to(i)</i>	Содержимое части ленты (данные) МТ передается $i$ -й машине
<i>Receive-data-from(i)</i>	МТ принимает содержимое части ленты (данные) от $i$ -й машины
<i>Send-config-to-all</i>	Текущая конфигурация МТ передается всем остальным машинам
<i>Send-config-to(i)</i>	Текущая конфигурация МТ передается $i$ -й машине
<i>Receive-config-from(i)</i>	МТ принимает текущую конфигурацию от $i$ -й машины
<i>Send-prog-to-all</i>	Текущая программа МТ передается всем остальным машинам
<i>Send-prog-to(i)</i>	Текущая программа МТ передается $i$ -й машине
<i>Receive-prog-from(i)</i>	МТ принимает текущую программу от $i$ -й машины

1	2
<i>Send-config-prog-to-all</i>	Текущая конфигурация и программа МТ передаются всем остальным машинам
<i>Send-config-prog-to(i)</i>	Текущая конфигурация и программа МТ передаются <i>i</i> -й машине
<i>Receive-config-prog-from(i)</i>	МТ принимает текущую конфигурацию и программу от <i>i</i> -й машины
<i>Generalized-cond-go-to-all</i>	Обобщенный условный переход, аналог операции $Y_0$ в МКВ, но эта операция выполняется не по цепочке, последовательно, а широковещательно. Исходная выделенная машина (например, <i>i</i> -я) после завершения собственных вычислений заставляет все остальные машины после завершения вычислений в каждой из них перейти в состояния $q_{Result(j)}$ , $j \neq i$ . Фиксируется содержимое всех лент и данные с них (результаты вычислений) могут быть затем переданы исходной <i>i</i> -й машине. Для этого каждая машина должна выполнить подпрограмму передачи символов со своих лент на одноименные ленты <i>i</i> -й машины, после чего каждая машина переходит в состояние $q_{0j}$ , $j \neq i$ , и останавливается. Выделенная <i>i</i> -я машина переходит в состояние $q_{0i}$ и останавливается после завершения обработки полученных результатов
<i>Generalized-go-to(i)</i>	Обобщенный безусловный переход первого типа, аналог операции $Y_1$ в МКВ: из данной МТ переводится в нужное состояние $q_{Result(i)}$ любая другая <i>i</i> -я машина. Это состояние может интерпретироваться как признак завершения вычислений. Дальнейшие действия машин аналогичны операции <i>Generalized-cond-go-to-all</i> для исходной и <i>i</i> -й машины
<i>Generalized-begin-to-all</i>	Обобщенный безусловный переход второго типа: выполняя данную операцию, данная машина инициирует начало работы всех остальных машин, переводя их в состояния $q_{1i}$
<i>Generalized-end-to-all</i>	Обобщенный безусловный переход третьего типа: выполняя данную операцию, данная машина инициирует окончание работы всех остальных машин, переводя их в состояния $q_{0i}$

Выполнение каждой операции осуществляется в машине Тьюринга в том случае, когда она переходит в специальное состояние, имя которого соответствует этой операции. Например, выполнение операции обобщенного безусловного перехода третьего типа происходит при нахождении машины Тьюринга в состоянии  $q_{Generalized-end-to-all}$ .

Каждая машина Тьюринга, расположенная в узле сети, обрабатывает содержимое собственных лент последовательно, поэтому можно применять основные приемы программирования, описанные в работах [17–22] и основанные на использовании в программах операций суперпозиции, композиции и разветвления. Данные способы сочетания машин Тьюринга облегчают про-

цесс программирования: можно разбивать задачу на подзадачи, последовательно или параллельно соединять программы для отдельных подзадач (суперпозиция или композиция машин соответственно), организовывать ветвления и циклы, т.е. язык тьюрингова программирования достаточно богат [20–21].

Дополнительно определенные локальные операции обмена и управления в сети машин Тьюринга описаны в табл. 2.

Таблица 2

Локальные узловые многоленточные операции обмена и управления в концептуальной модели распределенных вычислений на основе сети машин Тьюринга

Локальные операции	Комментарии
$Switch-local(i,j)$	Управляющее устройство $i$ -й машины, обрабатывающее содержимое ячеек своей основной $i$ -й ленты при помощи $i$ -й головки, попав в состояние $q_{Switch-local(i,j)}$ , передает обозреваемый $i$ -й головкой символ для записи в обозреваемую $j$ -й головкой ячейку на $j$ -й ленте и переключается на $j$ -ю головку для обработки содержимого ячеек $j$ -й ленты
$Return-local(j,i)$	Управляющее устройство $i$ -й машины, обрабатывающее содержимое ячеек $j$ -й ленты (одной из дополнительных лент) при помощи $j$ -й головки, попав в состояние $q_{Return-local(j,i)}$ , передает обозреваемый $j$ -й головкой символ для записи в обозреваемую $i$ -й головкой ячейку на $i$ -й (основной) ленте и переключается на $i$ -ю головку для обработки содержимого ячеек $i$ -й ленты
$Local-mode-to-all(i)$	Для управляющего устройства $i$ -й машины при попадании в состояние $q_{Local-mode-to-all(i)}$ становится возможным использование всех лент и головок при работе по одной $i$ -й программе $P_i$ . При этом обозреваемый $i$ -й головкой символ передается всем остальным головкам для записи в обозреваемые ими ячейки

Отличительной особенностью концептуальной модели распределенных вычислений является то, что в ней предусмотрен не только обмен данными между машинами Тьюринга в виде содержимого лент, но и обмен программами, а также текущими вычислениями в виде конфигураций машин Тьюринга. Это соответствует ряду распространенных парадигм организации распределенных вычислений: взаимодействующих последовательных процессов, агентно-ориентированного программирования и параллельной обработки структурированных данных.

Данная модель распределенных вычислений в глобальных вычислительных сетях имеет концептуальный характер и может быть использована для непосредственной программной реализации сети машин Тьюринга. Она дает представление о функциональной архитектуре распределенных вычислительных систем, о комплексе программ, который должен быть реализован, о плане распределения памяти, а также о виде передаваемых управляющих сообщений, данных и мобильных программ, что облегчает разработку проек-

та распределенного приложения, предназначенного для реализации на сети компьютеров.

## **2. Динамически модифицируемые формальные исполнимые модели инфокоммуникационных систем и процессов**

Рассматриваются некоторые динамически модифицируемые формальные модели для спецификации инфокоммуникационных систем и процессов. Декларируемая в работе концепция «непосредственной исполнимости» формальных моделей – это метафора, означающая, что разработка формализованных спецификаций является последним шагом для программиста перед непосредственным созданием сетевого программного обеспечения.

Рассматриваемые формальные динамически реконфигурируемые модели предназначены для описания и проектирования функциональной и системной архитектуры распределенных систем, создаваемых на основе инфраструктуры глобальных и локальных вычислительных сетей.

Используемые формализмы основаны на логических и алгебраических моделях. Эти модели возможно использовать для представления тех или иных свойств сетевого программного обеспечения. Однако в литературе не достаточно подробно освещены вопросы использования формальных моделей в случаях, когда функциональная или системная архитектура моделируемых систем подвержена изменениям в силу ряда объективных причин: увеличение или уменьшение числа средств обработки, хранения и передачи данных, изменение режима функционирования вследствие уменьшения или увеличения нагрузки на вычислительные мощности, корректировка программного обеспечения.

Динамически модифицируемые формальные модели для спецификации инфокоммуникационных систем и процессов могут относительно легко программироваться и реализовываться для распределенных вычислительных систем – облачных сред, грид-систем, беспроводных мобильных сетей. Используемая в работе концепция «непосредственной исполнимости» формальных моделей предполагает, что разработка на их основе формализованных спецификаций является последним шагом для программиста перед непосредственным созданием сетевого программного обеспечения. В противоположность этому подходу, например, в Университете Дьюка, США, шт. Северная Каролина (USA, Durham, North Carolina, Duke University), разработана программа FLAP (англ. Java Formal Languages and Automata Package) – свободная кроссплатформенная программа для экспериментов с различными объектами, встречающихся в теории формальных языков [23]. Возможности программы FLAP: имитирует машину Тьюринга, в том числе многоленточную; имитирует автоматы Мили и Мура; имитирует магазинный автомат; демонстрирует лемму о разрастании для регулярных и контекстно-свободных грамматик; схематично рисует недетерминированные конечные автоматы (НДКА) и детерминированные конечные автоматы (ДКА); «умеет» пошагово проводить преобразование регулярного выражения в НДКА и детерминизацию НДКА, а также минимизацию ДКА [23].

В отличие от данной и других подобных разработок, в настоящей работе введено новое понятие сети машин Тьюринга и ее описание, а далее также

будут рассмотрены формализованные спецификации основных реконфигурируемых дискретных моделей на основе теории алгебраических систем.

Алгебраические системы изучались многими исследователями. Одной из основополагающих работ является монография А. И. Мальцева [24]. Многоосновные, или многосортные, алгебраические системы детально описаны в монографии Б. И. Плоткина [25]. Родственная концепция эволюционирующих алгебр, в современной интерпретации автора – машин абстрактных состояний (МАС), была предложена в работах Ю. Гуревича; особенно важны введенные им понятия модификации предикатов и функций [26, 27]. Хорошо известно, что МАС могут моделировать другие типы машин, таких как машины Тьюринга, равнодоступные адресные машины и другие абстрактные машины. Главным отличием предлагаемой в настоящей работе концепции является заложенная в определение ряда формальных моделей возможность их реконфигурации. Другой отличительной особенностью предлагаемого подхода является структурирование сетей абстрактных модулей, или машин на основе использования некоторых элементов алгебры алгоритмов В. М. Глушкова [28, 29]. В частности, в данных работах определены суперпозиции альфа-дизъюнкций (для всюду определенных условий) вида  $[\alpha](A \vee B)$  – аналога оператора “if” и композиция вида:  $A*B$  или просто  $A; B$  – последовательное выполнение операторов. Следует далее отличать символ операции “;” от знака препинания. Операция “ $\leftarrow$ ” применяется для модификации значений переменных, функций и предикатов.

Концепция «непосредственно исполнимых» формальных моделей используется в смысле систем алгоритмических алгебр (САА) В. М. Глушкова. Совместное использование математического аппарата машин абстрактных состояний, алгоритмических алгебр и алгебраических систем в виде сетей абстрактных модулей (САМ) было предложено в работах [30–33].

Для обозначения понятия сети абстрактных модулей, или машин, будет использоваться аббревиатура САМ (англоязычный вариант – NAM, Network of Abstract Modules).

Для того чтобы использовать единый подход к построению непосредственно исполнимых моделей, используется понятие динамически модифицируемой многоосновной, или многосортной, алгебраической системы  $AS$ , определяющей сеть абстрактных модулей (данное определение  $AS$  основано на интеграции упомянутых выше абстракций МАС, САА и САМ согласно [30–33]):

$$AS = (A, P, F, I_{F0}, I_{P0}, Rules, M, Z), \quad (1)$$

где  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  – конечное множество основных множеств, или сортов  $A_1, A_2, \dots, A_n$ ;  $P$  – конечное множество предикатных символов;  $F$  – конечное множество функциональных символов;  $I_{F0}$  – начальная интерпретация функциональных символов;  $I_{P0}$  – начальная интерпретация предикатных символов;  $Rules$  – конечное множество правил модификаций, или обновлений, интерпретации предикатных и функциональных символов;  $M$  – конечное множество абстрактных модулей, построенных на основе операций и суперпозиций операций САА при всюду определенных логических условиях;  $Z: M \rightarrow \mathbf{P}(Rules)$  – отображение множества  $M$  на множество подмножеств множества  $Rules$ , где  $\mathbf{P}$  – символ булеана множества.

Таким образом, под воздействием множества  $M$  абстрактных модулей алгебраическая система  $AS$  эволюционирует, переходя от одних интерпретаций предикатов и функций к другим. При формализации абстрактных модулей будут также использоваться определенные в алгебре алгоритмов Глушкова операторы-константы  $E$  (тождественный, или пустой, оператор) и  $N$  (нигде не определенный, или невозможный, оператор), а также дополнительно вводимые операторы  $H$  (оператор останова) и оператор  $Ret$  (оператор возврата к проверке начального логического условия в абстрактном модуле).

Реконфигурируемая динамически модифицируемая многоосновная, или многосортная, алгебраическая система для сети абстрактных модулей теперь определяется на основе определения (1) следующим образом:

$$RAS = (A, P, F, I_{F0}, I_{P0}, Rules, M, Z, Rrules, R, W), \quad (2)$$

где дополнительно определены следующие понятия:  $Rrules$  – множество правил реконфигурации, которые могут изменять структуру сети абстрактных модулей, а также режим функционирования самих абстрактных модулей;  $R$  – конечное множество абстрактных модулей реконфигурации, построенных на основе операций и суперпозиций операций САА при всюду определенных логических условиях;  $W: R \rightarrow P(Rrules)$  – отображение множества модулей реконфигурации  $R$  на множество подмножеств множества  $Rrules$ , где  $P$  – символ булеана множества.

Модули сети, таким образом, бывают двух типов: операционные модули  $M$  и модули реконфигурации  $R$ . Операционные модули при необходимости могут выполнять функции реконфигурации путем изменения значений логических условий, проверяемых в самом модуле или в других модулях.

Для обозначения реконфигурируемой сети абстрактных модулей, или машин, используется аббревиатура РСАМ (англоязычный вариант – RNAM, Reconfigurable Network of Abstract Modules).

Правила реконфигурации из множества  $Rrules$  строятся аналогично правилам из множества  $Rules$ , но они могут в существенной степени изменять структурные и операционные свойства формальной модели. Например, правило

$$r_1 = M \leftarrow M \cup \{m_i\}$$

позволяет добавить к множеству  $M$  сети абстрактных модулей новый модуль  $m_i$ , а правило

$$r_2 = M \leftarrow M \setminus \{m_j\}$$

позволяет удалить модуль  $m_j$  из сети. Поэтому реконфигурацию сети САМ можно осуществлять, удаляя одни модули и заменяя их другими модулями с новой функциональностью. Подобные реконфигурации должны сопровождаться корректировкой составных логических выражений для условных частей абстрактных модулей.

В выражениях для правил реконфигурации, выполняющих операции над множествами, используются характеристические функции множеств. Пусть, например,  $f_M: M \rightarrow \{\mathbf{true}, \mathbf{false}\}$  – характеристическая функция (унарный предикат);  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$  – множество возможных абстрактных модулей в РСАМ. Тогда реализация правила  $f_M(m_i) \leftarrow \mathbf{true}$  (прежнее значение

высказывания  $f_M(m_i) = \mathbf{false}$ ) соответствует добавлению нового модуля  $m_i$  к сети, а реализация правила  $f_M(m_j) \leftarrow \mathbf{false}$  (при прежней истинности высказывания  $f_M(m_i) = \mathbf{true}$ ) соответствует удалению модуля  $m_j$  из сети. Развивая пример, введем условия  $\alpha$  и  $\beta$  и составим выражения для двух модулей реконфигурации РСАМ:

$$R_1 = [\alpha](f_M(m_i) \leftarrow \mathbf{true} \vee E);$$

$$R_2 = [\beta](f_M(m_j) \leftarrow \mathbf{false} \vee E),$$

где описанные выше правила  $f_M(m_i) \leftarrow \mathbf{true}$  и  $f_M(m_j) \leftarrow \mathbf{false}$  выполняются модулями  $R_1 \in \mathbf{R}$  и  $R_2 \in \mathbf{R}$  реконфигурации РСАМ при истинности условий  $\alpha$  и  $\beta$  – простых или составных высказываний, возможно, с предикатными символами и предметными константами. В общем случае  $\alpha$  и  $\beta$  – замкнутые (без свободных предметных переменных) выражения в логике предикатов.

Одно из правил  $f_M(m_i) \leftarrow \mathbf{true}$  или  $f_M(m_j) \leftarrow \mathbf{false}$  в зависимости от условий  $\alpha$  и  $\beta$  может быть выполнено следующим модулем реконфигурации:

$$R_{12} = [\alpha](f_M(m_i) \leftarrow \mathbf{true} \vee E) * [\beta](f_M(m_j) \leftarrow \mathbf{false} \vee E),$$

где символ операции “\*” композиции (последовательного выполнения) модулей можно заменить простой точкой с запятой “;”.

В основу построения модулей сетей САМ и РСАМ положена логика предикатов первого порядка. В многоосновном (многосортном) исчислении предикатов первого порядка каждому терму однозначно приписывается сорт данного терма (сорты в приложениях данной работы определены для таких классов объектов, как агенты, сетевые узлы, наборы данных, передаваемые сообщения). Имеет место следующее правило вывода [34]:

$$\frac{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k}{f(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k)},$$

где  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k$  – термы сортов  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_i, \dots, \pi_k$  соответственно;  $f$  –  $k$ -арный функциональный символ вида  $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_i, \dots, \pi_k \rightarrow \pi)$ ;  $f(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k)$  – терм сорта  $\pi$ .

Для эффективного отображения динамики предметной области путем модификации баз данных добавим к приведенному правилу вывода пару дополнительных правил модификации функций и предикатов:

$$\frac{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k, t_{k+1}}{f(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k) \leftarrow t_{k+1}} \text{ – правило модификации функции;}$$

$$\frac{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k, b}{p(t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k) \leftarrow b} \text{ – правило модификации предиката,}$$

здесь  $t_{k+1}$  – терм сорта  $\pi$ ;  $p$  –  $k$ -арный предикатный символ вида  $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_i, \dots, \pi_k)$ ;  $b$  – булев терм, принимающий значения в множестве  $\{\mathbf{true}, \mathbf{false}\}$ . Правила данного вида активно использованы в работах [26, 27], посвященных использованию аппарата машин с абстрактными состояниями.

Аналогично САА В. М. Глушкова модули САМ и РСАМ формируются на основе алгебр условий и модулей. Система образующих алгебры модулей

включает дополнительно, в отличие от САА, элементарные правила модификации предикатов и функций. Алгебра всюду определенных условий аналогична алгебре предикатов первого порядка.

### 3. Базовые реконфигурируемые модели: логико-алгебраические спецификации реконфигурируемых машин Тьюринга

В качестве базового примера, иллюстрирующего применение РСАМ при реконфигурации формальной модели некоторой дискретно-событийной системы, выбраны машины Тьюринга. В разд. 1 машины Тьюринга были выбраны в качестве узлов сети Тьюринга в концептуальной модели распределенных вычислений, моделирующей глобальные коммуникации и вычисления в вычислительной сети, поэтому вопросы реализации моделей данных машин на основе сетей абстрактных модулей САМ являются актуальными. Одним из важнейших приложений машин Тьюринга является обработка строк символов, а приложением сети Тьюринга, определенной в разд. 1, может быть распределенная символьная мультиобработка.

Описание машины Тьюринга, соответствующее эквивалентным описаниям из [19–22] и других работ, приведено в целях согласования дальнейших обозначений:

«Машина Тьюринга состоит из потенциально бесконечной в обе стороны ленты, управляющего устройства и головки. Лента разбита на ячейки, которые могут содержать символы из алфавита  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ . Этот алфавит содержит и пустой символ #, а любая ячейка, содержащая в данный момент этот символ, называется пустой ячейкой. Управляющее устройство может находиться в одном из состояний, принадлежащих множеству  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , где  $q_1$  – начальное состояние; в множестве  $Q$  выделено множество  $Q_0 \subset Q$  заключительных состояний. Головка может считывать символы с ленты, записывать их на ленту и перемещаться в одну из сторон вдоль ленты. В каждый момент времени головка обозревает одну ячейку ленты. При работе машины Тьюринга повторяется следующая последовательность действий:

- 1) считывание символа, находящегося в ячейке напротив головки;
- 2) поиск единственной (для детерминированной машины Тьюринга) команды, имеющей вид  $qa \rightarrow q'a'w$ , где  $q$  – текущее состояние управляющего устройства,  $a$  – считанный символ (для недетерминированных машин таких команд с одинаковой левой частью  $qa$  может быть несколько);
- 3) выполнение выбранной команды: перевод управляющего устройства в новое состояние  $q'$ , запись в текущую обозреваемую ячейку символа  $a'$  вместо стираемого символа  $a$  и последующее перемещение головки вправо, если  $w = R$ , и влево, если  $w = L$ , или отсутствие движения головки при  $w = S$ .

Машина останавливается, если для пары  $qa$  нет команды вида  $qa \rightarrow q'a'w$  или новое состояние  $q'$  принадлежит множеству  $Q_0$  заключительных состояний. Результат работы остановившейся машины – заключительное слово на ленте. Машина Тьюринга перерабатывает начальные слова на ленте в заключительные, задавая тем самым словарную функцию, для которой начальные слова являются значениями аргумента, а заключительные – значениями функции».

Известны различные способы моделирования машин Тьюринга: частично-рекурсивными функциями, системами подстановок и др. Некоторые приемы программирования на машинах Тьюринга приведены, например, в

работам [35, 36]. Известно [19, 37], что модель машины Тьюринга допускает расширения: можно рассматривать машины Тьюринга с произвольным числом лент и многомерными лентами с различными ограничениями; все эти машины являются полными по Тьюрингу и моделируются обычной машиной Тьюринга. Из других модификаций машин Тьюринга известны недетерминированные машины Тьюринга, вероятностные машины Тьюринга, квантовые машины Тьюринга (абстрактные машины, используемые для моделирования квантовых компьютеров), нейронные машины Тьюринга, в которых нейросети используют внешнюю память для записи и последующего чтения информации так же, как это делает машина Тьюринга [19, 37, 38].

Работу одноленточных машин Тьюринга, как детерминированных, так и недетерминированных, опишем логико-алгебраическим выражением  $M$  для модуля сети абстрактных машин САМ (данное описание основано на понятиях абстракций МАС, САА и САМ; здесь и далее в настоящей работе построение динамических исполнимых моделей на языке САМ базируется на исправленных нами и дополненных формализованных спецификациях из работы [30]):

**Базовая модель  $M$  для одноленточной машины Тьюринга:**

$$\begin{aligned}
 &M = Place(Head) \leftarrow 0; State(q_1) \leftarrow \mathbf{true}; \\
 &[(\exists_{Sel\_one} q) State(q)]([a \leftarrow Tape(Place(Head))] \\
 &([\exists_{Sel}(q, a, q', a', w) Program(q, a, q', a', w)] \\
 &(\{[S_{Q0}(q')](H \vee E); Tape(Place(Head)) \leftarrow a'; \\
 &State(q) \leftarrow \mathbf{false}; State(q') \leftarrow \mathbf{true}; \{[w = R] \\
 &(Place(Head) \leftarrow Inc(Place(Head)) \vee \\
 &[w = L](Place(Head) \leftarrow Dec(Place(Head)) \vee E)\}); Ret\} \vee N) \vee N) \vee N), \quad (3)
 \end{aligned}$$

где  $q$  – символ, обозначающий текущее состояние управляющего устройства,  $q \in Q$ ,  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ ;

$Q$  – внутренний алфавит, или множество внутренних состояний управляющего устройства;

$a$  – символ, находящийся в текущей ячейке ленты, обозреваемой головкой,  $a \in A$ ,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ ;

$A$  – внешний алфавит символов, размещаемых в ячейках ленты;

$q_1$  – начальное состояние управляющего устройства,  $q_1 \in Q$ ;

$q'$  – следующее состояние управляющего устройства,  $q' \in Q$ ;

$a'$  – следующий символ в ячейке ленты, обозреваемый головкой после очередного перемещения,  $a' \in A$ ;

$w \in \{R, L, S\}$  – переменная, значения которой определяют направление перемещения головки машины Тьюринга – сдвиг головки на одну ячейку вправо ( $R$ ), сдвиг на одну ячейку влево ( $L$ ) и отсутствие движения головки ( $S$ ),  $W = \{R, L, S\}$ ;

$\exists_{Sel\_one}$  – оператор выбора единственного кортежа (в текущем примере кортеж содержит единственный элемент – номер состояния устройства управления), отвечающего некоторому условию, из отношения, являющегося

областью истинности предиката, записанного справа; в случае, если условию выбора отвечает не один кортеж или не удалось выбрать единственный кортеж, то работа реализации машины Тьюринга прекращается и фиксируется ошибочная ситуация;

$\exists_{Sel}$  – “псевдооператор” САМ, который следует заменить оператором выбора  $\exists_{Sel\_one}$  единственного кортежа вида  $(q, a, q', a', w)$  при реализации детерминированной машины Тьюринга (ДМТ) или оператором  $\exists_{Sel\_all}$  выбора нескольких кортежей, отвечающих условию выбора – то есть выбранной паре  $(q, a)$ , из отношения, являющегося областью истинности предиката *Program* для недетерминированной машины Тьюринга (НМТ). Для реализации на основе выражения *M* вероятностной машины Тьюринга (ВМТ) на место псевдооператора  $\exists_{Sel}$  следует поставить оператор выбора  $\exists_{Sel\_any}$ : в случае, если условию выбора отвечает не один кортеж (команда машины Тьюринга), то выбирается любой из них в соответствии с заданной вероятностью;

$Program(q, a, q', a', w)$  – предикат, область истинности которого определяет рабочую программу машины Тьюринга:

$$Program: (Q \times A) \times (Q \times A \times W) \rightarrow \{\mathbf{true}, \mathbf{false}\};$$

*Tape* – унарная функция, определяющая последовательность символов на ленте:

$$Tape: \mathbf{Z} \rightarrow A, \text{ где } \mathbf{Z} \text{ – множество целых чисел;}$$

*Place* – унарная функция, определяющая текущее положение головки:

$Place: Hd \rightarrow \mathbf{Z}$ , где *Hd* – множество имен головок для многоленточных машин Тьюринга; в данном случае для одноленточной машины Тьюринга это множество содержит лишь одно имя  $Hd = \{Head\}$ , где *Head* является предметной константой, или именем единственной головки;

$State(q)$  – унарный предикат, определяющий состояние управляющего устройства машины Тьюринга (в любой момент времени истинно высказывание  $(\exists!q)State(q)$ , где  $State: Q \rightarrow \{\mathbf{true}, \mathbf{false}\}$ ), а  $\exists!$  – известный в математической логике квантор “существует единственный элемент, для которого истинно некоторое высказывание”;

*Inc* и *Dec* – инкрементная и декрементная функции соответственно; данные функции увеличивают или уменьшают на единицу значение переменной, указывающее на текущее положение головки;

$S_{Q_0}(q)$  – характеристическая функция подмножества финальных состояний  $Q_0 \subset Q$ , причем  $q_1 \notin Q_0$ ;  $S_{Q_0}: Q \rightarrow \{\mathbf{true}, \mathbf{false}\}$ ;

*Ret* – завершающий оператор блока, т.е. выражения, заключенного в фигурные скобки; он возвращает управление на первое условие цепочки условий перед блоком, приведшей к выполнению данного блока – в данном примере к условию  $[(\exists_{Sel\_one} q) State(q)]$ .

Одним из символов внешнего алфавита  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  является пустой символ, обозначаемый символом #.

Работа машин Тьюринга подробно описана в литературе, поэтому далее будут описаны в основном особенности моделирования машины Тьюринга модулем (3) сети абстрактных модулей *M*. Работа упомянутых при описании САМ-моделей разновидностей машин Тьюринга – ДМТ, НМТ и ВМТ будет конкретизирована на такой же основе.

Устройство управления может находиться в одном из состояний, определяемых внутренним алфавитом  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ . Непересекающиеся подмножества начальных и конечных состояний  $Q_1 \subset Q$  and  $Q_0 \subset Q$  соответственно определяют начало и окончание работы машины Тьюринга. Машина Тьюринга останавливается, если  $q \in Q_0$  после выполнения очередной команды (при истинном высказывании  $S_{Q_0}(q)$ ). Для рассматриваемого примера  $Q_1 = \{q_1\}$ .

Список всех кортежей, или команд вида  $(q, a, q', a', w)$ , в области истинности предиката *Program* составляет программу машины Тьюринга. В приведенном примере кортеж  $(q_i, a_j, q', a', w)$  начинается с пары символов  $(q_i, a_j)$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $n$  – число состояний устройства управления,  $m$  – число символов внешнего алфавита  $A$ . В программе детерминированной машины Тьюринга для фиксированных  $q_i$  и  $a_j$  может присутствовать лишь один кортеж (команда), начинающийся с этих двух символов, называемых левой частью команды. Для недетерминированной машины Тьюринга таких команд, начинающихся с пары  $(q_i, a_j)$ , может быть несколько. Значения элементов данной пары определяются в соответствии с приведенным выше выражением  $M$  следующим образом:

$$q_i = (\exists_{Sel\_one} q) State(q); a_j = Tape(Place(Head)).$$

В соответствии с первым выражением оператор  $(\exists_{Sel\_one} q)$  выбирает значение символа  $q$ , соответствующее текущему состоянию управляющего устройства (естественно, что это значение должно быть единственным в области истинности унарного предиката *State*). В соответствии со вторым выражением сначала при помощи унарной функции *Place* определяется местоположение головки *Head* управляющего устройства (т.е. номер текущей ячейки), а затем при помощи унарной функции *Tape* определяется содержимое ячейки, обозреваемой головкой в данный момент времени.

Пара операторов в выражении  $M$  для модуля САМ

$$Place(Head) \leftarrow 0; State(q_1) \leftarrow \mathbf{true}$$

определяет начальное местоположение головки (на нулевой ячейке) и начальное состояние управляющего устройства  $q_1$ .

Во второй строке

$$[(\exists_{Sel\_one} q) State(q)][(a \leftarrow Tape(Place(Head)))]$$

проверяются два условия. Первое условие формулируется следующим образом: “состояние  $q$  управляющего устройства определено”, а второе – “символ с текущей ячейки, обозреваемой головкой *Head*, определен и стал значением предметной переменной  $a$ ”. На то, что таким образом определены условия, указывают квадратные скобки. Ранее такой же синтаксис выражений с квадратными скобками был определен для суперпозиций операций  $\alpha$ -дизъюнкции в алгебре алгоритмов Глушкова.

Таким образом, к началу выполнения оператора

$$[(\exists_{Sel}(q, a, q', a', w)Program(q, a, q', a', w))]$$

значения предметных переменных  $q$  и  $a$  (т.е. левая часть команды) определены, что делает возможным выполнить команду  $(q, a, q', a', w)$  машины

Тьюринга. Как было принято ранее при определении выражения  $M$ , псевдо-оператор  $\exists_{Sel}$  заменяется “рабочим” оператором  $\exists_{Sel\_one}$  для ДМТ и оператором  $\exists_{Sel\_all}$  для НМТ. Далее по ключу  $(q, a)$  в области истинности предиката  $Program$ , т.е. в программе машины Тьюринга, производится поиск одного кортежа-команды для ДМТ или множества кортежей-команд для НМТ. Программа, т.е. область истинности предиката  $Program$ , определяется самим разработчиком, т.е. сам разработчик определяет, какая машина Тьюринга моделируется – детерминированная или недетерминированная. Для ДМТ в области истинности предиката  $Program$  не может быть двух или более кортежей с одинаковой левой частью  $(q, a)$  команды  $(q, a, q', a', w)$ . Поэтому для ДМТ с помощью оператора  $\exists_{Sel\_one}$  будет выбран единственный кортеж, удовлетворяющий условию поиска. Для НМТ таких кортежей может оказаться несколько, и в таком случае оператор  $\exists_{Sel\_all}$  работает, создавая копии мгновенных описаний (МО) и несколько экземпляров машин. Работа НМТ и ВМТ будет пояснена в дальнейшем изложении.

Во фрагменте  $[S_{Q_0}(q')(H \vee E)]$  выражения  $M$  производится проверка факта достижения конечного состояния: истинность высказывания  $S_{Q_0}(q')$  означает, что достигнуто одно из конечных состояний в множестве  $Q_0$  и в модуле  $M$  выполняется оператор  $H$ , останавливающий работу машины Тьюринга. В противном случае, при ложности высказывания  $S_{Q_0}(q')$ , машина продолжает свою работу после выполнения тождественного (пустого) оператора  $E$ . Затем при помощи оператора  $Tape(Place(Head)) \leftarrow a'$  в текущую ячейку  $Tape(Place(Head))$  ленты с номером  $Place(Head)$  записывается новый символ  $a'$ , и устройство управления переходит из прежнего состояния  $q$  в новое состояние  $q'$ :

$$State(q) \leftarrow \text{false}; State(q') \leftarrow \text{true}.$$

Переменная  $w$ , значение которой являлось последним в выбранной команде, используется для определения направления перемещения головки – сдвиг головки на одну ячейку вправо ( $w = R$ ), сдвиг на одну ячейку влево ( $w = L$ ) и отсутствие движения головки ( $w = S$ ):

$$\{[w = R](Place(Head) \leftarrow Inc(Place(Head))) \vee [w = L](Place(Head) \leftarrow Dec(Place(Head))) \vee E\}.$$

Функция  $Inc$  увеличивает номер текущей ячейки  $Place(Head)$  на единицу, а функция  $Dec$  уменьшает его на единицу. В данном выражении использована суперпозиция двух  $\alpha$ -дизъюнкций.

После выполнения оператора возврата  $Ret$  управление передается на повторное выполнение действий в модуле  $M$ , начиная с проверки условия  $[(\exists_{Sel\_one} q) State(q)]$ . Каждый из трех невозможных операторов  $N$  выполняется при последовательном возникновении ошибочных ситуаций. На этом описание работы модуля сети САМ, моделирующего детерминированную, недетерминированную или вероятностную машину Тьюринга при различных интерпретациях псевдооператора  $\exists_{Sel}$ , закончено.

Реконфигурации машин Тьюринга, как детерминированных (РДМТ), так и недетерминированных (РНМТ), задаются правилами реконфигурации. Эти правила могут изменять программы работы машин Тьюринга. Например,

возможно изменить программу рассмотренной ранее машины путем использования следующих правил:

$$Program(q_5, a_{10}, q_1, a_1, L) \leftarrow \mathbf{false};$$

$$Program(q_5, a_{10}, q_2, a_2, R) \leftarrow \mathbf{true}.$$

Данные правила модифицируют предикат *Program*: первое правило удаляет кортеж-команду  $(q_i, a_j, q_1, a_1, L)$  из области истинности предиката, а второе – добавляет кортеж-команду  $(q_i, a_i, q_2, a_2, R)$  в эту область. Включив данные правила в выражение *M*, получим следующее выражение *RM* для абстрактного модуля PCAM:

$$\begin{aligned} RM = & Place(Head) \leftarrow 0; State(q_1) \leftarrow \mathbf{true}; \\ & [(\exists_{Sel\_one} q) State(q)]([a \leftarrow Tape(Place(Head))] \\ & ([\exists_{Sel}(q, a, q', a', w) Program(q, a, q', a', w)] \\ & (\{[S_{Q0}(q')](H \vee E); Tape(Place(Head)) \leftarrow a'; \\ & State(q) \leftarrow \mathbf{false}; State(q') \leftarrow \mathbf{true}; \{[q' = q_5] \\ & (\{Program(q_5, a_{10}, q_1, a_1, L) \leftarrow \mathbf{false}; \\ & Program(q_5, a_{10}, q_2, a_2, R) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E)\}); \\ & \{[w = R](Place(Head) \leftarrow Inc(Place(Head))) \vee \\ & [w = L](Place(Head) \leftarrow Dec(Place(Head)) \vee E)\}); \\ & Ret\} \vee N) \vee N) \vee N). \end{aligned} \quad (4)$$

То есть, достигнув состояния  $q_5$ , машина модифицирует свою программу путем замены одной команды на другую.

В общем случае правила реконфигурации могут быть включены в выражения для модулей PCAM в следующем виде:

$$\{C \leftarrow Cond; [C](\{C \leftarrow \mathbf{false}; \langle \text{последовательность правил реконфигурации} \rangle \vee E)\},$$

где *Cond* – некоторое условие (замкнутое выражение в логике предикатов; это условие может зависеть от внешней среды); *C* – булева переменная, а  $\langle \text{последовательность правил реконфигурации} \rangle$  – это множество *Rrules* согласованных правил реконфигурации, которые изменяют программу машины Тьюринга. К числу важных случаев можно отнести такие, когда  $Cond = P_{eq}(a, a_R)$ , где  $P_{eq}$  – бинарный предикат сравнения на равенство, а  $a_R \in A$  – символ на входной ленте, после считывания которого модифицируется программа, или  $Cond = P_{eq}(q, q_R)$ , где  $q_R \in Q$  – состояние устройства управления.

На основе предыдущих примеров логико-алгебраических выражений *M* и *RM* построены PCAM-модели и для многоленточной (детерминированной, недетерминированной и вероятностной) машины Тьюринга (рис. 3). Формальное определение многоленточной машины Тьюринга приведено, например, в работах [17–19].

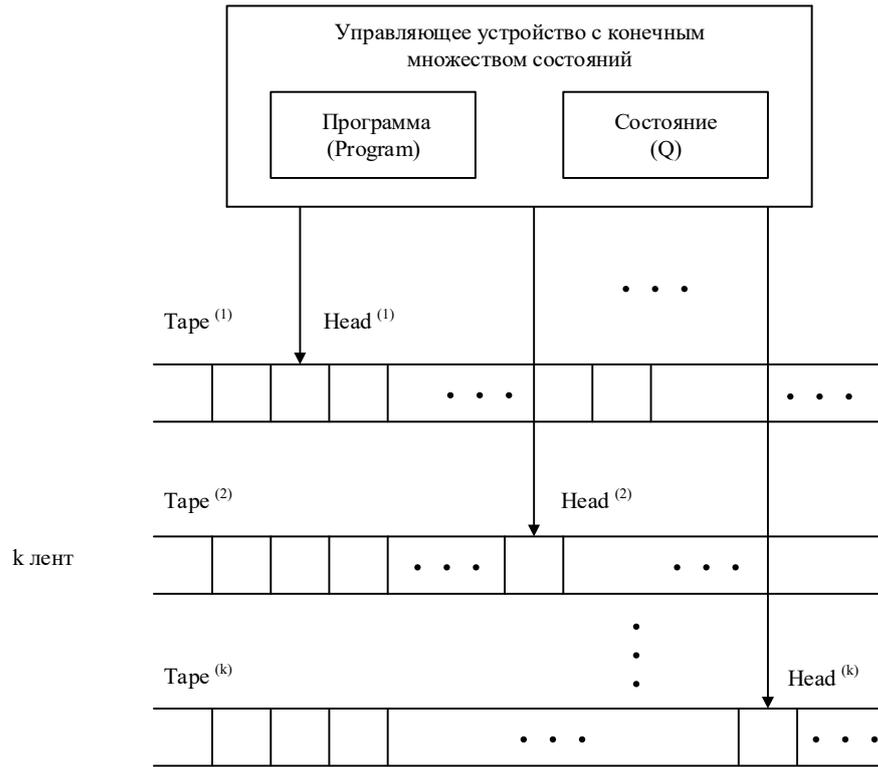


Рис. 3. Многоленточная машина Тьюринга [17]

Модель *RMK* реконфигурируемой многоленточной и многоголовочной машины Тьюринга представлена следующим РСАМ-выражением:

$$\begin{aligned}
 &RMK = Place(Head^{(1)}) \leftarrow 0; Place(Head^{(2)}) \leftarrow 0; \dots; Place(Head^{(k)}) \leftarrow 0; \\
 &State(q_1) \leftarrow \mathbf{true}; [(\exists_{One} q) State(q)]([a^{(1)} \leftarrow Tape^{(1)}(Place(Head^{(1)}))]) \\
 &([a^{(2)} \leftarrow Tape^{(2)}(Place(Head^{(2)}))]) \dots \\
 &\dots ([a^{(k)} \leftarrow Tape^{(k)}(Place(Head^{(k)}))]) \\
 &([\exists_{Set}(q, a^{(1)}, a^{(2)}, \dots, a^{(k)}, q', a'^{(1)}, a'^{(2)}, \dots, a'^{(k)}, w^{(1)}, w^{(2)}, \dots, w^{(k)}) \\
 &Program(q, a^{(1)}, a^{(2)}, \dots, a^{(k)}, q', a'^{(1)}, a'^{(2)}, \dots, a'^{(k)}, w^{(1)}, w^{(2)}, \dots, w^{(k)})] \\
 &(\{[S_{Q0}(q')](H \vee E); \\
 &Tape^{(1)}(Place(Head^{(1)})) \leftarrow a'^{(1)}; \\
 &Tape^{(2)}(Place(Head^{(2)})) \leftarrow a'^{(2)}; \dots, Tape^{(k)}(Place(Head^{(k)})) \leftarrow a'^{(k)}; \\
 &State(q) \leftarrow \mathbf{false}; State(q') \leftarrow \mathbf{true}; \\
 &\{[w^{(1)} = R](Place(Head^{(1)}) \leftarrow Inc(Place(Head^{(1)})) \vee \\
 &[w^{(1)} = L](Place(Head^{(1)}) \leftarrow Dec(Place(Head^{(1)})) \vee E)\}); \\
 &\{[w^{(2)} = R](Place(Head^{(2)}) \leftarrow Inc(Place(Head^{(2)})) \vee \\
 &[w^{(2)} = L](Place(Head^{(2)}) \leftarrow Dec(Place(Head^{(2)})) \vee E)\}); \dots
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \dots, \{[w^{(k)} = R](Place(Head^{(k)}) \leftarrow Inc(Place(Head^{(k)})) \vee \\ & [w^{(k)} = L](Place(Head^{(k)}) \leftarrow Dec(Place(Head^{(k)})) \vee E)\}; \\ & \{C \leftarrow Cond; [C](\{C \leftarrow \mathbf{false}\}; \langle \text{последовательность правил} \\ & \text{реконфигурации} \rangle \vee E)\}; Ret\} \vee N) \vee N) \dots \vee N) \vee N) \vee N), \end{aligned} \quad (5)$$

где верхние индексы соответствуют номерам головок и лент. Модель *RMK* многоленточной машины Тьюринга (5) предназначена для использования (при соответствующем доопределении) в качестве формализованной концептуальной модели мобильных вычислений в сетевом узле сети машин Тьюринга, описанной в разд. 1.

#### 4. Особенности интерпретации реконфигурируемых недетерминированных машин Тьюринга сетями абстрактных модулей

Машины Тьюринга возможно использовать для распознавания языков, поиска и замены цепочек в последовательностях символов, что может использоваться при поиске информации в распределенных облачных сервисах баз данных. В отличие от обычной детерминированной машины Тьюринга недетерминированная машина Тьюринга при некоторой комбинации текущего состояния устройства управления  $q$  и считанного символа  $a$  с доступной головке текущей ячейки может допускать несколько вариантов дальнейших действий. Для одноленточной НМТ задается функция перехода  $Q \times A \rightarrow \mathbf{P}(Q \times A \times W)$ , соответствующая отношению  $Rel \subseteq (Q \times A) \times (Q \times A \times W)$ . Здесь  $\mathbf{P}$  – символ булеана. Детерминированным переходам НМТ соответствует функция  $Q \times A \rightarrow Q \times A \times W$ .

Использование НМТ в различных целях подробно описано, например, в работе [17]:

«по аналогии с недетерминированными конечными автоматами НМТ имеет конечное число возможных шагов, из которых в очередной момент выбирается какой-то один. Входная цепочка  $x$  допускается, если по крайней мере одна последовательность шагов для входа  $x$  приводит к допускающему мгновенному описанию (МО). Мгновенным описанием  $k$ -ленточной машины Тьюринга *МК* называется набор  $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_k\}$ , где  $\alpha_i$  для каждого  $i$  представляет собой слово вида  $xqu$ , где  $xu$  – слово на  $i$ -й ленте машины *МК*,  $q$  – текущее состояние машины. Головка на  $i$ -й ленте обозревает символ, стоящий справа от  $q$  в слове  $xqu$ , т.е. первый символ слова  $u$ . При данной входной цепочке  $x$  можно считать, что НМТ *МК* параллельно выполняет все возможные последовательности шагов, пока не достигнет допускающего МО, или пока не окажется, что дальнейшие шаги невозможны. После  $i$  шагов можно считать, что существует много экземпляров *МК*, причем каждый экземпляр представляет МО, в котором машина *МК* может оказаться после  $i$  шагов. На  $(i + 1)$ -м шаге экземпляр  $C$  порождает  $j$  своих экземпляров, если НМТ, находясь в МО  $C$ , может выбрать следующий шаг  $j$  способами».

В настоящей работе при описании модели НМТ в терминах сетей абстрактных модулей предлагается использовать квантифицированный оператор выбора  $\exists_{Sel\_all}$  (заменяющий псевдооператор  $\exists_{Sel}$  в выражениях  $M$ ,  $RM$  и  $RMK$  для базовых моделей машин Тьюринга), соответствующая интерпретация которого, т.е. учет каждого состояния перехода при формировании каж-

дой соответствующей копии машины  $M$ ,  $RM$  или  $RMK$ , позволяет определять различные параллельно работающие после очередного шага экземпляры машины, как это было определено в цитируемой работе [17].

### 5. Особенности интерпретации реконфигурируемых вероятностных машин Тьюринга сетями абстрактных модулей

Сетью абстрактных модулей возможно моделировать вероятностные машины Тьюринга, которые отличаются тем, что квантифицированный оператор  $\exists_{Sel\_any}$  (вставляемый в соответствующее САМ-выражение  $M$  для обычной детерминированной машины Тьюринга вместо псевдооператора  $\exists_{Sel}$ ) на каждом шаге работы ВМТ выполняет вероятностный выбор следующего состояния из нескольких возможных. Тип рассматриваемой здесь ВМТ выбран по аналогии с вероятностными автоматами. В случае ВМТ паре “текущее состояние – текущий символ в обозреваемой ячейке на ленте” в программе соответствуют несколько вариантов троек “следующее состояние – новый символ на ленте – направление перемещения головки”. Как известно, от недетерминированной машины Тьюринга ВМТ (здесь рассматривается одна из основных известных модификаций ВМТ) отличается тем, что она вместо недетерминированного перехода к нескольким вариантам выбирает один из вариантов с некоторой вероятностью. ВМТ, выбирая следующий вариант поведения, реализует случайную (в случае компьютерного моделирования – псевдослучайную) функцию вида  $Rand: Q \times A \rightarrow Q \times A \times W$ . При этом для всех пятерок  $\forall(q, a, q', a', v) \in Q \times A \times Q \times A \times V$  значение  $Rand(q, a, q', a', v)$  – это вероятность того, что управляющее устройство ВМТ, находясь в состоянии  $q$  и считав символ  $a$  из доступной головке ячейки, в ту же ячейку запишет символ  $a'$ , затем перейдет в состояние  $q'$ , а головка сместится на одну ячейку влево ( $w = L$ ), вправо ( $w = R$ ) или останется на прежнем месте ( $w = S$ ).

### Заключение

Предложено новое унифицированное описание на базе аппарата формализованных спецификаций – сетей абстрактных модулей основных типов математических абстракций: детерминированных, недетерминированных и вероятностных машин Тьюринга с переменной конфигурацией. Описание позволяет строить исполнимые модели функционирования распределенных вычислительных систем с переменной структурой, пригодные для создания элементов функциональной архитектуры распределенных вычислительных систем в виде прототипного и рабочего программного обеспечения промежуточного (*middleware*) уровня.

Предложена обобщенная концептуальная модель функциональной архитектуры агентно-ориентированной РВС с переменной структурой и мобильным программным обеспечением на базе сети машин Тьюринга, позволяющая разработчику оценивать свойства и определять состав программного обеспечения РВС. На практике такая модель пригодна для реализации на ее основе прототипного программного обеспечения систем распределенной и параллельной символьной мультиобработки данных.

Даны рекомендации по интерпретации реконфигурируемых детерминированных, недетерминированных и вероятностных машин Тьюринга сетями

абстрактных модулей, что позволяет строить концептуально-поведенческие исполнимые модели распределенных вычислений и систем, отличающихся переменной, гибкой, масштабируемой и мобильной структурой.

**Библиографический список**

1. **Tanenbaum, A. S.** Distributed Systems: principles and paradigms. 2nd Edition / A. S. Tanenbaum, Maarten Van Steen. – Pearson Education, Inc., 2007. – 669 p.
2. FIPA Specifications. – URL: <http://www.fipa.org/specifications/index.html> (дата обращения: 12.11.2019).
3. A Survey of Programming Languages and Platforms for Multi-Agent Systems / R. H. Bordini et al. // Informatica. – 2006. – Vol. 30. – P. 33–44.
4. **Kravari, K.** A Survey of Agent Platforms / K. Kravari, N. Bassiliades // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2015. – Vol. 18 (1), № 11. – P. 1–18.
5. **Cynthia, N.** Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms / N. Cynthia, M. Gregory // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2009. – Vol. 12 (2). – URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>
6. **Bellifemine, F. L.** Developing multi-agent systems with JADE / F. L. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood. – Wiley. – 2007. – 300 p. – DOI 10.1002/9780470058411
7. P2P Agent Platform: Implementation and Testing / V. Gorodetsky, O. Karsaev, V. Samoylov, S. Serebryakov // The AAMAS Sixth International Workshop on Agents and Peer-to-Peer. Computing (AP2PC 2007). – Honolulu, 2007. – P. 41–54.
8. Development of Mobile Agents with Aglets (A Java Based Tool) / M. Yadav, P. Sethi, D. Juneja, and N. Chauhan // Int. Journal of Innovations & Advancement in Computer Science. – 2015. – Vol. 4, Special Issue. – P. 245–251.
9. **Evrpidou, P.** Metacomputing with Mobile Agents / P. Evripidou, G. Samaras // Int. Journal of Parallel Programming. – 2006. – Vol. 34, № 5. – P. 429–458.
10. **Barelos, D.** Mobile agents procedures: metacomputing in Java / D. Barelos, E. Pitoura, G. Samaras // Proc. of the ICDCS Workshop on Distributed Middleware (in conjunction with the 19th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS99)). – Austin, TX USA, 1999. – P. 90–95.
11. Extendible, Mobile-Agent Based Services for the Materialization and Maintenance of Personalized and Shareable Web Views ViSMA / G. Samaras, K. Karenos, P. K. Chrysanthis, and E. Pitoura // In Proc. 11th DEXA Int. Workshop on Mobility in Databases and Distributed Systems. – 2003. – P. 974–979.
12. Web Crawler Based on Mobile Agent and Java Aglets / Md. Abu Kausar, V. S. Dhaka, Sanjeev Kumar Singh // International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS). MECS Publisher. – 2013. – Vol. 5, № 10. – P. 85–91.
13. **Dada, E. G.** Performance Evaluation of AGLETS and JADE Mobile Agent Using Encryption and Decryption Time / E. G. Dada, S. B. Joseph, and M. K. Mishra // Radioelectronics&Informatics. – 2010. – № 4. – P. 16–20.
14. **Lange, D.** Programming and deploying Java mobile agents with aglets / D. Lange, M. Oshima. – Addison-Wesley Professional, 1998. – 256 p.
15. **Волчихин, В. И.** Организация функционирования облачно-сетевых распределенных вычислительных систем с архитектурой «агенты как сервисы» / В. И. Волчихин, С. А. Зинкин, Н. С. Карамышева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 27–50. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-3.
16. **Евреинов, Э. В.** Однородные вычислительные системы, структуры и среды / Э. В. Евреинов. – Москва : Радио и связь, 1981. – 208 с.
17. **Ахо, А.** Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – Москва : Мир, 1979. – 536 с.

18. **Ахо, А.** Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. Том 1. Синтаксический анализ / А. Ахо, Дж. Ульман. – Москва : Мир, 1978. – 613 с.
19. **Хопкрофт, Д. Э.** Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Джон Э. Хопкрофт, Раджив Мотвани, Джеффри Д. Ульман. – 2-е изд. : пер. с англ. – Москва : Вильямс, 2008. – 528 с.
20. **Гаврилов, Г. П.** Задачи и упражнения по дискретной математике / Г. П. Гаврилов, А. А. Сапоженко. – Москва : Физматлит, 2005. – 416 с
21. **Шоломов, Л. А.** Основы теории дискретных логических и вычислительных устройств / Л. А. Шоломов. – Москва : Наука, 1980. – 400 с.
22. **Котов, В. Е.** Теория схем программ / В. Е. Котов, В. К. Сабельфельд. – Москва : Наука, 1991. – 248 с.
23. Java Formal Languages and Automata Package [свободная кроссплатформенная программа для экспериментов с различными объектами, встречающимися в теории формальных языков. Разрабатывается Университетом Дьюка]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/JFLAP> (дата доступа: 31.10.2020).
24. **Мальцев, А. И.** Алгебраические системы / А. И. Мальцев. – Москва : Наука, 1970. – 393 с.
25. **Плоткин, Б. И.** Универсальная алгебра, алгебраическая логика и базы данных / Б. И. Плоткин. – Москва : Наука, 1991. – 448 с.
26. **Gurevich, Y.** Abstract State Machines: An Overview of the Project / Y. Gurevich // Foundations of Information and Knowledge Systems. Lect. Notes Comput. Sci. – 2004. – Vol. 2942. – P. 6–13.
27. **Boerger, E.** Unifying View of Models of Computation and System Design Frameworks / E. Boerger // Annals of Pure and Applied Logic. – 2005. – Vol. 133. – P. 149–171.
28. Алгеброалгоритмические модели и методы параллельного программирования / Ф. И. Андон, А. Е. Дорошенко, Г. Е. Цейтлин, Е. А. Яценко. – Киев : Академперіодика, 2007. – 634 с.
29. **Глушков, В. М.** Алгебра. Языки. Программирование / В. М. Глушков, Г. Е. Цейтлин, Е. Л. Ющенко. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Киев : Наукова думка, 1989. – 376 с.
30. Directly executable formal models of middleware for MANET and Cloud Networking and Computing / D. V. Pashchenko, S. A. Zinkin, Mustafa Sadeq Jaafar, D. A. Trokoz, T. U. Pashchenko and M. P. Sinev // Proceedings of the 4th International Conference on Science & Engineering in Mathematics, Chemistry and Physics (SciTech 2016) Bandung, Indonesia, April 23–24, 2016 / Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 710. – P. 012024. – DOI 10.1088/1742-6596/710/1/012024.
31. **Зинкин, С. А.** Сети абстрактных машин высших порядков в проектировании систем и сетей хранения и обработки данных (механизмы интерпретации и варианты использования) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 4. – С. 37–51.
32. **Зинкин, С. А.** Сети абстрактных машин высших порядков в проектировании систем и сетей хранения и обработки данных (базовый формализм и его расширения) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 13–22.
33. **Зинкин, С. А.** Элементы новой объектно-ориентированной технологии для моделирования и реализации систем и сетей хранения и обработки данных / С. А. Зинкин // Информационные технологии. – 2008. – № 10. – С. 20–27.
34. **Колмогоров, А. Н.** Математическая логика / А. Н. Колмогоров, А. Г. Драгалин. – Москва : Изд-во УРСС, МГУ, 2005. – 240 с.
35. **Поликарпова, Н. И.** Автоматное программирование / Н. И. Поликарпова, А. А. Шалыто. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского гос. ун-та информационных технологий, механики и оптики, 2008. – 167 с.

36. Туккель, Н. И. От тьюрингова программирования к автоматному / Н. И. Туккель, А. А. Шалыто // Мир ПК. – 2002. – № 2. – С. 144–149.
37. Машина Тьюринга. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Машина\\_Тьюринга](https://ru.wikipedia.org/wiki/Машина_Тьюринга) (дата обращения: 31.10.2020).
38. Neural Turing Machines / Alex Graves, Greg Wayne, Ivo Danihelka. – London, UK, 2014. – P. 1–26. – arXiv:1410.5401

### References

1. Tanenbaum A. S., Van Steen M. *Distributed Systems: principles and paradigms. 2nd Edition*. Pearson Education, Inc., 2007, 669 p.
2. *FIPA Specifications*. Available at: <http://www.fipa.org/specifications/index.html> (accessed Nov. 12, 2019).
3. Bordini R. H. et al. *Informatica*. 2006, vol. 30, pp. 33–44.
4. Kravari K. A, Bassiliades N. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2015, vol. 18 (1), no. 11, pp. 1–18.
5. Cynthia N., Gregory M. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2009, vol. 12 (2). Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>.
6. Bellifemine F. L., Caire G., Greenwood D. *Developing multi-agent systems with JADE*. Wiley. 2007, 300 p. DOI 10.1002/9780470058411
7. Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S. *The AAMAS Sixth International Workshop on Agents and Peer-to-Peer. Computing (AP2PC 2007)*. Honolulu, 2007, pp. 41–54.
8. Yadav M., Sethi P., Juneja D., Chauhan N. *Int. Journal of Innovations & Advancement in Computer Science*. 2015, vol. 4, Special Issue, pp. 245–251.
9. Evripidou P., Samaras G. *Int. Journal of Parallel Programming*. 2006, vol. 34, no. 5, pp. 429–458.
10. Barellos D., Pitoura E., Samaras G. *Proc. of the ICDCS Workshop on Distributed Middleware (in conjunction with the 19th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS99))*. Austin, TX USA, 1999, pp. 90–95.
11. Samaras G., Karenos K., Chrysanthis P. K., Pitoura E. *In Proc. 11th DEXA Int. Workshop on Mobility in Databases and Distributed Systems*. 2003, pp. 974–979.
12. Md. Abu Kausar, Dhaka V. S., Sanjeev Kumar Singh *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*. MECS Publisher. 2013, vol. 5, no. 10, pp. 85–91.
13. Dada E. G., Joseph S. B., Mishra M. K. *Radioelectronics&Informatics*. 2010, no. 4, pp. 16–20.
14. Lange D., Oshima M. *Programming and deploying Java mobile agents with aglets*. Addison-Wesley Professional, 1998, 256 p.
15. Volchikhin V. I., Zinkin S. A., Karamysheva N. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings Volga region. Engineering sciences]. 2019, no. 4 (52), pp. 27–50. DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-3. [In Russian]
16. Evreinov E. V. *Odnorodnye vychislitel'nye sistemy, struktury i sredy* [Homogeneous computing systems, structures and environments]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 208 p. [In Russian]
17. Akho A., Khopkroft Dzh., Ul'man Dzh. *Postroenie i analiz vychislitel'nykh algoritmov* [The design and analysis of computer algorithms]. Moscow: Mir, 1979, 536 p. [In Russian]
18. Akho A., Ul'man Dzh. *Teoriya sintaksicheskogo analiza, perevoda i kompilyatsii. Tom 1. Sintaksicheskii analiz* [The theory of parsing, translation and compiling. Volume 1. Parsing]. Moscow: Mir, 1978, 613 p. [In Russian]

19. Khopkroft D. E., Motvani R., Ul'man D. D. *Vvedenie v teoriyu avtomatov, yazykov i vychisleniy* [Introduction to automata theory, languages, and computation]. 2nd ed.: transl. from Engl. Moscow: Vil'yams, 2008, 528 p. [In Russian]
20. Gavrilov G. P., Sapozhenko A. A. *Zadachi i uprazhneniya po diskretnoy matematike* [discrete mathematics problems and exercises]. Moscow: Fizmatlit, 2005, 416 p. [In Russian]
21. Sholomov L. A. *Osnovy teorii diskretnykh logicheskikh i vychislitel'nykh ustroystv* [Fundamentals of the theory of discrete logical and computing devices]. Moscow: Nauka, 1980, 400 p. [In Russian]
22. Kotov V. E., Sabel'fel'd V. K. *Teoriya skhem programm* [Program circuit theory]. Moscow: Nauka, 1991, 248 p. [In Russian]
23. *Java Formal Languages and Automata Package [svobodnaya krossplatformennaya programma dlya eksperimentov s razlichnymi ob"ektami, vstrechayushchikhsya v teorii formal'nykh yazykov. Razrabatyvaetsya Universitetom D'yuka]* [Java Formal Languages and Automata Package [a free cross-platform program for experimenting with various objects found in the theory of formal languages. Developed by Duke University]]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/JFLAP> (accessed Oct. 31, 2020). [In Russian]
24. Mal'tsev A. I. *Algebraicheskie sistemy* [Algebraic Systems]. Moscow: Nauka, 1970, 393 p. [In Russian]
25. Plotkin B. I. *Universal'naya algebra, algebraicheskaya logika i bazy dannykh* [Universal algebra, algebraic logic, and databases.]. Moscow: Nauka, 1991, 448 p. [In Russian]
26. Gurevich Y. *Foundations of Information and Knowledge Systems. Lect. Notes Comput. Sci.* 2004, vol. 2942, pp. 6–13.
27. Boerger E. *Annals of Pure and Applied Logic.* 2005, vol. 133, pp. 149–171.
28. Andon F. I., Doroshenko A. E., Tseytlin G. E., Yatsenko E. A. *Algebraicheskaya logika i metody parallel'nogo programmirovaniya* [Algebraic algorithmic models and methods of parallel programming]. Kiev: Akademperiodika. 2007, 634 p.
29. Glushkov V. M., Tseytlin G. E., Yushchenko E. L. *Algebra. Yazyki. Programirovanie* [Algebra. Languages. Programming]. 3rd ed., rev. and suppl. Kiev: Naukova dumka, 1989, 376 p.
30. Pashchenko D. V., Zinkin S. A., Mustafa Sadeq Jaafar, Trokoz D. A., Pashchenko T. U., Sinev M. P. *Proceedings of the 4th International Conference on Science & Engineering in Mathematics, Chemistry and Physics (SciTech 2016) (Bandung, Indonesia, April 23–24, 2016)*. 2016, vol. 710, p. 012024. DOI 10.1088/1742-6596/710/1/012024.
31. Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 4, pp. 37–51. [In Russian]
32. Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 3, pp. 13–22. [In Russian]
33. Zinkin S. A. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies]. 2008, no. 10, pp. 20–27. [In Russian]
34. Kolmogorov A. N., Dragalin A. G. *Matematicheskaya logika* [Mathematical logic]. Moscow: Izd-vo URSS, MGU, 2005, 240 p. [In Russian]
35. Polikarpova N. I., Shalyto A. A. *Avtomatnoe programmirovaniye* [Automated programming]. Saint-Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, 2008, 167 p. [In Russian]
36. Tukkel' N. I., Shalyto A. A. *Mir PK* [PC world]. 2002, no. 2, pp. 144–149. [In Russian]
37. *Mashina T'yuringa* [Turing machine]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Mashina\\_T'yuringa](https://ru.wikipedia.org/wiki/Mashina_T'yuringa) (accessed Oct. 31, 2020). [In Russian]
38. Graves A., Wayne G., Danihelka I. *Neural Turing Machines*. London, UK, 2014, pp. 1–26. arXiv:1410.5401

***Волчихин Владимир Иванович***

доктор технических наук, профессор,  
президент Пензенского государственного  
университета (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [cnit@pnzgu.ru](mailto:cnit@pnzgu.ru)

***Volchihin Vladimir Ivanovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
president of Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Зинкин Сергей Александрович***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [vt@pnzgu.ru](mailto:vt@pnzgu.ru)

***Zinkin Sergey Aleksandrovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of computer engineering,  
Penza State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Карамышева Надежда Сергеевна***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [vt@pnzgu.ru](mailto:vt@pnzgu.ru)

***Karamysheva Nadezhda Sergeevna***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of computer  
engineering, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Волчихин, В. И. Концептуальные модели функциональной архитектуры мобильных реконфигурируемых агентно-ориентированных распределенных вычислительных систем / В. И. Волчихин, С. А. Зинкин, Н. С. Карамышева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 65–91. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-6.

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

УДК 620.1.08

DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-7

*Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко,  
А. Н. Кравцов, В. С. Александров, М. В. Бержинская*

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗА ДЛЯ СИНТЕЗА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ОЛОВА<sup>1</sup>

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Преимущества метода спрей-пиролиза заключаются в способности производить высокооднородные пленки большой площади при приемлемых (от 100 до 500 °С) значениях температуры технологического процесса. Метод не требует использования вакуума на всех стадиях процесса. Цель исследования заключается в выборе оптимальных технологических параметров для получения прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова, обладающих минимальным поверхностным сопротивлением.

*Материалы и методы.* Представлены технологические этапы процесса получения образцов прозрачных проводящих оксидов на основе диоксида олова в рамках подготовки поверхности стеклянных подложек, приготовления растворов прекурсоров, нанесения на поверхность подложек нелегированных и легированных сурьмой пленок диоксида олова.

*Результаты.* Разработана методика синтеза образцов прозрачных проводящих оксидов на основе диоксида олова методом спрей-пиролиза, эмпирически установлены оптимальные значения технологических параметров, нацеленных на достижение минимального поверхностного сопротивления образцов с покрытием SnO<sub>2</sub>.

*Выводы.* Предложенные технологические режимы позволяют синтезировать методом спрей-пиролиза прозрачные проводящие оксиды на основе диоксида олова, обладающие поверхностным сопротивлением  $R_s = 27 \text{ Ом}/\square$ , что соответствует современному мировому уровню промышленно производимых прозрачных проводящих покрытий на основе оксида индия, легированного оловом. Полученные результаты подтверждают целесообразность изготовления методом спрей-пиролиза прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова.

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90044.

© Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Кравцов А. Н., Александров В. С., Бержинская М. В., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

**Ключевые слова:** спрей-пиролиз, диоксид олова, прекурсор, прозрачный проводящий оксид, поверхностное сопротивление.

*E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko,  
A. N. Kravtsov, V. S. Aleksandrov, M. V. Berzhinskaya*

## **A DEVELOPMENT OF SPRAY-PYROLYSIS TECHNOLOGY FOR SYNTHESIS OF TRANSPARENT CONDUCTIVE COATINGS BASED ON TIN DIOXIDE**

### **Abstract.**

*Background.* The advantages of the spray-pyrolysis method are the ability to produce films with a high area and a high degree of uniformity at acceptable (from 100 to 500 °C) process temperatures. The method does not require the use of vacuum at all stages of the process. The aim of the study is to select the optimal technological parameters for obtaining transparent conductive coatings based on tin dioxide with minimal surface resistance.

*Materials and methods.* Such technological stages of the process of obtaining samples of transparent conducting oxides based on tin dioxide are presented in the research as preparation of the surface of glass substrates; preparation of precursor solutions; deposition of pure and antimony-doped films of tin dioxide on the surface of substrates.

*Results.* A method for the synthesis of transparent conducting oxides samples based on tin dioxide by the spray-pyrolysis method was developed, and the optimal values of technological parameters aimed at achieving the minimum surface resistance of samples with a SnO<sub>2</sub> coating were established empirically.

*Conclusions.* The proposed technological modes make it possible to synthesize by spray pyrolysis transparent conducting oxides based on tin dioxide with a surface resistance  $RS = 27 \text{ Ohm}/\square$ , which corresponds to the modern world level of industrially produced transparent conducting coatings based on tin-doped indium oxide. The results obtained confirm the feasibility of manufacturing transparent conductive coatings based on tin dioxide by spray-pyrolysis.

**Keywords:** spray-pyrolysis, tin dioxide, precursor, transparent conductive oxide, surface resistance.

### **Введение**

Одним из перспективных химических методов получения тонких пленок и различных тонкопленочных структур является метод спрей-пиролиза, также называемый методом пиролиза аэрозолей. Распыляемый раствор обычно изготавливают на основе воды и растворимых солей компонентов требуемого материала – основы синтезируемой тонкой пленки. Спрей-пиролиз в настоящее время широко используется для создания прозрачных проводящих оксидных пленок [1]. В основу рассматриваемого метода положено пиролитическое разложение на предварительно нагретую подложку металлического соединения, которое растворено в жидкой смеси. В то же время растворители и иные летучие продукты, которые являются побочными, выбрасываются в паровой фазе. Давление газа-носителя и геометрические размеры распыляющего сопла являются факторами, определяющими величину капель распыляемого раствора.

Технологии синтеза полупроводниковых тонких пленок методов спрей-пиролиза присущи следующие преимущества: сравнительно невысокая стои-

мость, высокая однородность получаемых пленок, возможность получения пленок большой площади, относительно простой способ внедрения примеси [2]. Посредством изменения концентрации примеси в растворе осуществляется варьирование процентного содержания примеси легированного образца. Синтезирование слоистых пленок и пленок, имеющих градиенты состава по толщине, реализуется путем изменения состава распыляемого раствора во время процесса распыления. Существенное преимущество метода спрей-пиролиза с точки зрения его промышленного использования заключается в том, что на всех стадиях технологического процесса не требуется вакуум. Требуемые значения толщины синтезируемой пленки, скорости ее осаждения достигаются посредством варьирования технологических параметров.

Структура технологической установки, реализующей метод спрей-пиролиза, приведена на рис. 1. Метод спрей-пиролиза осуществляется в условиях приемлемой температуры (в диапазоне от 100 до 500 °С) и позволяет выполнять нанесение пленок не только на высокопрочных материалах.

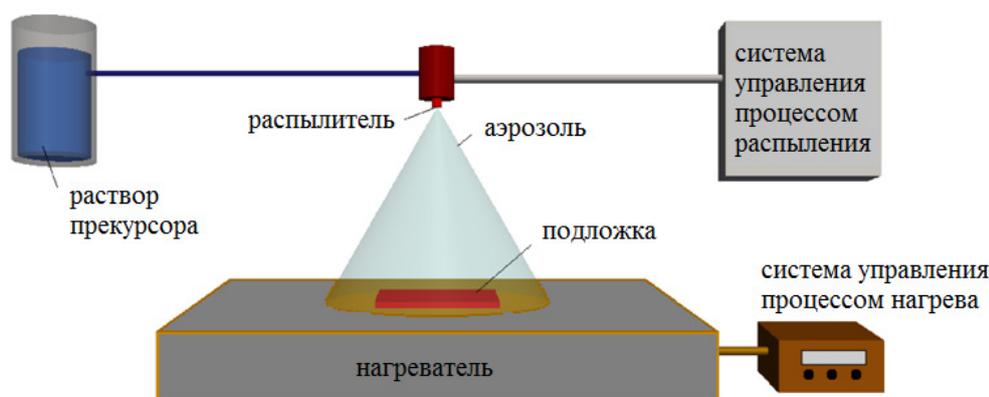


Рис. 1. Структура технологической установки, реализующей метод спрей-пиролиза

Таким образом, с учетом отмеченных преимуществ, а также благодаря высокой производительности в промышленных масштабах пиролиз аэрозолей целесообразно использовать при получении тонких пленок оксидов металлов (групп I-VI, II-VI, III-VI, IV-VI, V-VI, VIII-VI), бинарных халькогенидов (групп II-II-VI, II-III-VI, II-VI-VI), тернарных халькогенидов (групп V-II-VI) [3]. Следует отметить перспективность использования метода спрей-пиролиза для синтеза оксидных пленок, обладающих сверхпроводящими свойствами, а также для получения многокомпонентных, неокисных и композиционных порошков (пористых, а также наночастиц).

Ниже рассмотрены требования к выбору прекурсора и процессу распыления. От выбора прекурсора аэрозолей (истинных растворов, эмульсий, золь, коллоидных дисперсий) зависят свойства синтезируемых пленок различных соединений. Водные растворы, как правило, используют по причине наличия большой номенклатуры водорастворимых солей металлов, из-за их низкой стоимости и безопасности обработки. При этом к растворяемому веществу предъявляется требование высокой растворимости.

Процесс распыления растворов предусматривает использование следующих типов распылителей: электростатических, пневматических, ультразву-

ковых. Перечисленным распылителям присущи разные размеры капель, различная скорость распыления, а следовательно, и разная производительность технологического процесса. Кроме того, скорость распыления определяет продолжительность пребывания капель в воздухе во время распыления, а следовательно, влияет на качество получаемой пленки. При использовании ультразвукового распылителя размер капель определяется плотностью раствора, поверхностным натяжением, вязкостью. В случае пневматического распылителя на размер капель оказывает влияние разность давлений (например, величина капель увеличивается с уменьшением разности давлений).

В процессе спрей-пиролиза имеют место следующие основные этапы: растворитель испаряется с поверхности капли, пары растворителя диффундируют в каплю, происходит изменение температуры капли, по направлению к центру капли происходит диффузия растворенного вещества.

От рассмотренных этапов во многом зависит стехиометрия пленки [4].

В процессе пиролиза аэрозолей целесообразно выделить технологические стадии (их последовательность иллюстрирует рис. 2), которые включают в себя распыление из распылителя водного раствора, процесс испарения растворителя, формирование осадка и его пиролиз, формирование и нарастание пленки; в итоге на подложке образуется тонкий слой пленки [5].

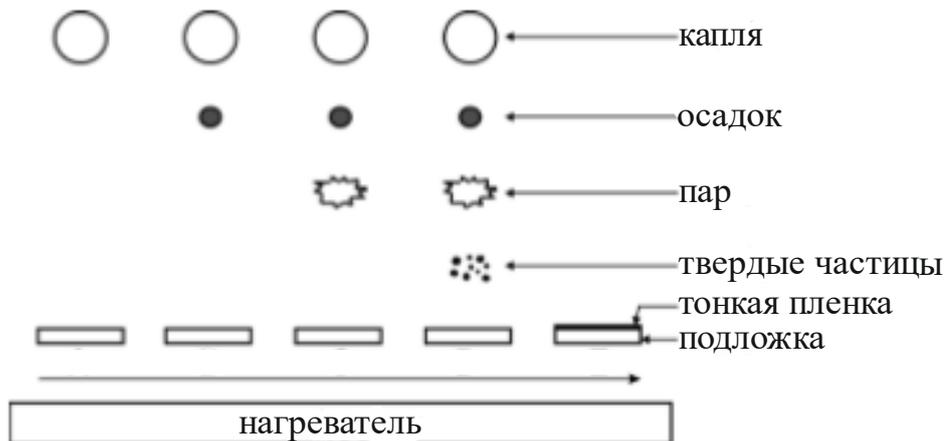


Рис. 2. Основные стадии формирования тонкой пленки при использовании метода спрей-пиролиза

Таким образом, качество формируемой тонкопленочной структуры зависит от процесса испарения растворителя из капель, от процесса диффузии вещества к центру капли и от температуры капель раствора.

### 1. Материал и методика исследования

Ниже рассмотрен процесс формирования пленок прозрачных проводящих оксидов (ППО) на основе диоксида олова на стеклянных подложках с использованием метода спрей-пиролиза. Целесообразно выделить следующие технологические стадии:

1. Подготовка поверхностей подложек. В качестве материала подложек использовано натриево-кальциево-силикатное стекло, подложки имеют пря-

моугольную форму. Прежде чем разместить подложки в реакционной камере технологической установки, необходимо очистить их поверхность от загрязнений, оказывающих негативное влияние на адгезию (прочность сцепления поверхностей). Подготовка поверхностей подложек включала следующую последовательность операций:

- обработка пищевой содой, промывка подложек водопроводной водой;
- погружение подложек в этанол и их ультразвуковая очистка на протяжении 30 мин (при этом объем этанола зависит от количества подложек и их геометрических размеров);
- помещение подложек в дистиллированную воду и их промывка;
- размещение подложек в емкости с хромовой смесью (представляет собой смесь концентрированной серной кислоты ( $H_2SO_4$ ) и дихромата калия ( $K_2Cr_2O_7$ )) при температуре  $70\text{ }^\circ\text{C}$  и обработка на протяжении 10 мин;
- подогрев дистиллированной воды и промывка подложек;
- проверка качества очистки подложек, для чего подложки следует поместить в емкость с дистиллированной водой. При этом на подложке, подготовленной надлежащим образом, имеет место равномерное *распределение воды ровным слоем*;
- нагрев электрической плитки до  $100\text{ }^\circ\text{C}$  и выполнение сушки подложек.

Таким образом, при подготовке подложек применены следующие вещества: гидрокарбонат натрия (пищевая сода,  $NaHCO_3$ ); этанол ( $C_2H_5OH$ ); дистиллированная вода; хромовая смесь. Использованное лабораторное оборудование включает ультразвуковую ванну, электрическую плитку, химическую посуду, дистиллятор, вытяжной шкаф.

2. Приготовление растворов прекурсоров. В начале рассмотрим последовательность получения раствора прекурсора № 1 для синтеза чистых пленок диоксида олова.

Для расчета массы прекурсора № 1  $m_{precl}$  использована известная формула [6]:

$$m_{precl} = C_M \cdot V_{rast} \cdot M_{precl} = 5,26 \text{ г}, \quad (1)$$

где  $M_{precl1}$  – молярная масса прекурсора № 1;  $V_{rast}$  – объем раствора,  $V_{rast} = 60$  мл;  $C_M$  – молярная концентрация,  $C_M = 0,25$  моль/л.

Для взвешивания прекурсора использованы электронные весы. В емкость, содержащую 30 мл этанола, помещался взятый с рассчитанной массой порошок тетрахлорида пентагидрата олова. С целью растворения прекурсора, произведено перемешивание приготовленной смеси с использованием магнитной мешалки на протяжении 10 мин. Затем в емкость был добавлен этанол (до достижения отметки 60 мл). После этого в течение 30 мин было проведено повторное перемешивание раствора. Раствор следует готовить во время сушки подложек, т.е. непосредственно перед его использованием.

Теперь рассмотрим процесс приготовления раствора для получения пленок диоксида олова, легированных сурьмой. В данном случае раствор должен содержать прекурсор № 1 и прекурсор № 2.

Прекурсор № 1 необходимо взять массой  $m_{precl}$  и растворить в емкости с этанолом (30 мл). Затем туда требуется добавить порошок трихлорида

сурьмы, имеющий массу  $m_{prec2}$ . Полученную массу необходимо перемешать магнитной мешалкой за 10 мин. Далее в емкость добавляется этанол (до уровня отметки 60 мл), после чего необходимо повторить перемешивание на протяжении 90 мин.

Получение пленок диоксида олова, имеющих разные уровни легирования, достигается посредством использования прекурсора № 2. При этом в полученном растворе используются разные значения мольной доли трихлорида сурьмы  $N_{prec2} = (0,001; 0,0005; 0,00025)$ . Для расчета массы порошка трихлорида сурьмы  $m_{prec2}$  использована формула

$$m_{prec2} = n_{prec2} \cdot M_{prec2}, \quad (2)$$

где  $M_{prec2}$  – молярная масса прекурсора № 2;  $n_{prec2}$  – количество вещества прекурсора № 2.

Известно, что мольная доля компонента раствора определяется отношением количества вещества рассматриваемого компонента к общему количеству вещества суммарных компонентов в растворе. Поэтому для расчета количества вещества прекурсора № 2  $n_{prec2}$  применена следующая формула:

$$n_{prec2} = \frac{N_{prec2} (n_{C_2H_5OH} + n_{prec1})}{1 - N_{prec2}}, \quad (3)$$

где  $n_{C_2H_5OH}$  – количество вещества этанола;  $n_{prec1}$  – количество вещества прекурсора № 1.

Ниже представлены результаты вычислений масс порошка трихлорида сурьмы  $m_{prec2}$  при соответствующих концентрациях прекурсора № 2:

$$m_{prec2} = \begin{pmatrix} 0,055 \\ 0,11 \\ 0,22 \end{pmatrix} \text{ г при } N_{prec2} = \begin{pmatrix} 0,025 \\ 0,05 \\ 0,1 \end{pmatrix} \text{ \%}.$$

Таким образом, для приготовления растворов прекурсоров необходимы следующие вещества: тетрагидрид пентагидрат олова ( $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) для прекурсора № 1; трихлорид сурьмы ( $\text{SbCl}_3$ ) для прекурсора № 2; в качестве растворителя использован этанол ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ).

Для приготовления растворов прекурсоров необходимо следующее оборудование: электронные весы, химическая посуда, магнитная мешалка, вытяжной шкаф.

3. Нанесение чистых и легированных сурьмой пленок диоксида олова на поверхности стеклянных подложек. Для нанесения пленок диоксида олова, отличающихся различными значениями уровней легирования сурьмой, в установке спрей-пиролиза осуществлен следующий ряд операций:

– размещение подложки в реакционной камере установки спрей-пиролиза;

– постепенный нагрев подложки в реакционной камере до достижения нагревателем значения температуры  $T_S = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- нагнетание воздуха посредством включения компрессора;
- посредством регулятора компрессора подача в пневматический распылитель воздуха, имеющего давление  $p = 2$  бар;
- отслеживание достижения температуры раствора значения  $T_S$ , после чего производится открытие шарового крана с целью подачи сжатого воздуха от компрессора к распылителю при заданном давлении;
- распыление на подготовленную и нагретую подложку раствора;
- окончание процесса распыления раствора путем закрытия шарового крана при нагреве нагревателя  $T_S$  до значения  $420$  °С.

## 2. Результаты

Технологические режимы (в том числе материал подложек; требования к прекурсорам, растворителю, газу-носителю; объем раствора, расстояние между распылителем и подложкой; входное давление воздуха в распылителе; температура нагревателя) получения пленок прозрачных проводящих оксидов на основе диоксида олова сведены в табл. 1. Простейший эксперимент по измерению  $R_S$  основан на использовании мультиметра, что иллюстрирует рис. 3. Внешний вид синтезированных образцов показан на рис. 4, 5. Критерием оптимизации технологических параметров  $T_S$ ,  $C_M$ ,  $l$ ,  $p$  выступает минимизация поверхностного сопротивления  $R_S$  образцов с ППО.

Таблица 1

Технологические режимы процесса синтеза ППО

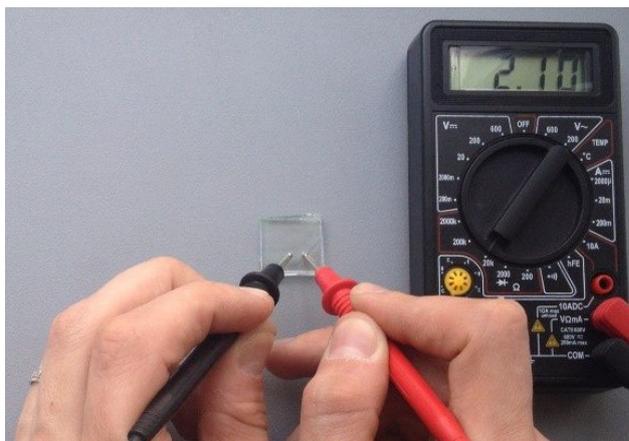
Технологические режимы (обозначение)	Требование к параметрам
Материал подложек	натриево-кальциево-силикатное стекло
Прекурсор № 1	$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Прекурсор № 2	$\text{SbCl}_3$
Растворитель	этанол
Газ-носитель	сжатый воздух
Концентрация прекурсора № 1 ( $C_M$ ), моль/л	0,25
Мольная доля прекурсора № 2 ( $N_{prec2}$ ), мол. %	0,1; 0,05; 0,025
Объем раствора ( $V_{rast}$ ), мл	от 5 до 20
Расстояние между распылителем и подложкой ( $l$ ), мм	300
Входное давление воздуха в распылителе ( $p$ ), бар	2
Температура нагревателя ( $T_S$ ), °С	450

На рис. 5 можно увидеть, что образцы являются прозрачными, однако дать количественную оценку прозрачности можно лишь с помощью спектрофотометрии.

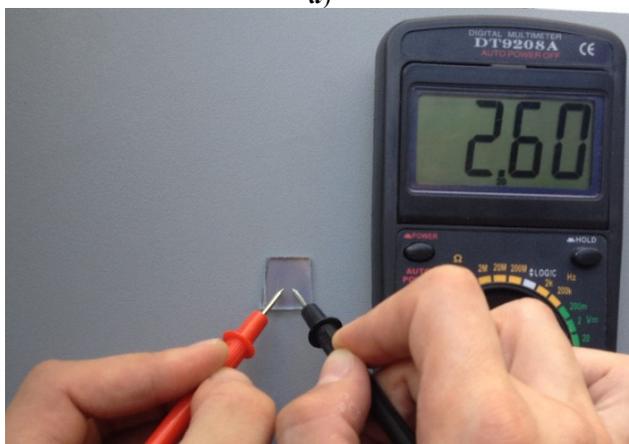
## 3. Обсуждение

При исследовании оптических свойств прозрачных проводящих покрытий рассмотрено явление интерференции в тонких пленках [7]. При прохождении сквозь синтезированную пленку ППО световой луч отражается от наружной и от внутренней поверхностей. Таким образом, отраженные лучи

удовлетворяют условию интерференции, поскольку являются когерентными, им присуща постоянная разность фаз.



а)



б)

Рис. 3. Процесс измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих покрытий на основе  $\text{SnO}_2$  при объеме раствора 10 мл:

а –  $C_M = 0,25$  моль/л; б –  $C_M = 0,3$  моль/л

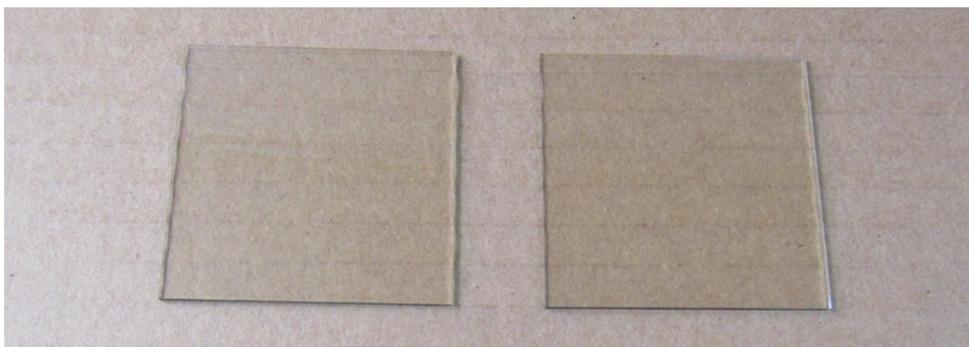


Рис. 4. Внешний вид синтезированных прозрачных проводящих покрытий на основе  $\text{SnO}_2$

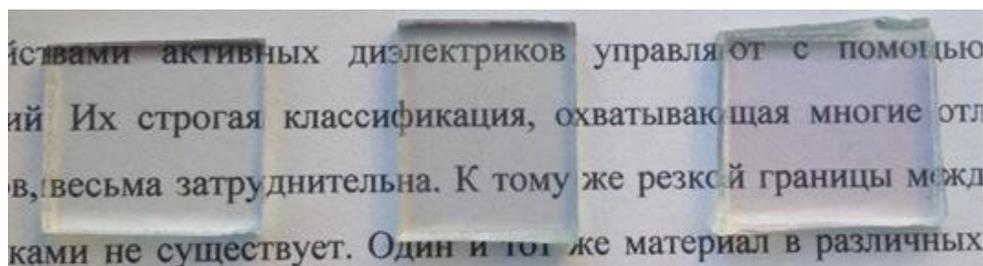


Рис. 5. Фотография, наглядно демонстрирующая прозрачность образцов с нанесенным прозрачным проводящим покрытием при мольной доле прекурсора № 2, равной 0,05 мол. %

Таким образом, явление интерференции может быть положено в основу принципа измерения и контроля толщины и равномерности формируемой пленки ППО, поскольку ее цвет зависит от толщины [9, 10]. В свою очередь толщина пленки при использовании метода спрей-пиролиза во многом зависит от объема распыленного раствора. Авторами статьи синтезированы пленки ППО при различных значениях технологических параметров, приведенных в табл. 2.

Таблица 2  
Технологические параметры получения экспериментальных образцов

№ образца	$\chi$ , %	$C_M$ , моль/л	V, мл
1	0	0,1	5
2			10
3			15
4			20
5		0,2	5
6			10
7			15
8		0,25	20
9			5
10			10
11			15
12		0,3	20
13			5
14			10
15		0,025	15
16	5		
17	10		
18	15		
19	0,05		5
20			10
21		15	
22		20	
23	0,1	5	
24		10	
25		15	
26		20	

### Заключение

Разработанная технология спрей-пиролиза позволяет синтезировать прозрачные проводящие оксиды на основе диоксида олова. В результате измерений электрофизических параметров синтезированных образцов с нанесенными ППО установлено, что наименьшее значение поверхностного сопротивления составляет 27 Ом/□. Это значение одного порядка с величиной поверхностного сопротивления ППО покрытий на основе оксида индия, легированного оловом – одних из наиболее широко производимых на данный момент прозрачных проводящих покрытий [8].

### Библиографический список

1. **Зинченко, Т. О.** Анализ материалов, используемых для производства прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.- практ. конф. (г. Пенза, 14 марта 2018 г.) / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 256–258.
2. **Зинченко, Т. О.** Анализ методов получения прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.- практ. конф. (г. Пенза, 14 марта 2018 г.) / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – 258 с.
3. Анализ локальных областей полупроводниковых нанообъектов методом туннельной атомно-силовой микроскопии / Н. А. Лашкова, Н. В. Пермяков, А. И. Максимов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2015. – № 1 (213). – С. 31–42.
4. **Унтила, Г. Г.** Влияние концентрации олова на состав, оптические и электрические свойства пленок ИТО, осажденных методом ультразвукового спрей-пиролиза на кремний и стекло / Г. Г. Унтила, Т. Н. Кост, А. Б. Чеботарева, М. А. Тимофеев // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, № 7. – С. 984–990.
5. **Кондрашин, В. И.** Исследование динамических характеристик нагревателя подложек в установке для спрей пиролиза / В. И. Кондрашин, А. М. Метальников, Р. М. Печерская, В. А. Соловьев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 147–148.
6. **Биркина, Н. И.** Методические рекомендации по проведению практических работ дисциплины Химия / Н. И. Биркина. – Ростов-на-Дону, 2015. – 48 с.
7. **Долгов, В. В.** Фотометрия в лабораторной практике / В. В. Долгов, Е. Н. Ованесов, К. А. Щетникович. – Москва : Российская медицинская академия последипломного образования, 2004. – Т. 103.
8. **Zinchenko, T. O.** The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis / T. O. Zinchenko, E. A. Pecherskaya, D. V. Artamonov // AIMS Materials Science. – 2019. – Vol. 6 (2). – P. 276–287. – DOI 10.3934/materci.2019.2.276.
9. **Наумов, А. В.** Обзор мирового рынка индия (Экономика индия) / А. В. Наумов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2005. – №. 4. – С. 12–17.
10. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis / T. O. Zinchenko, V. I. Kondrashin, E. A. Pecherskaya, A. S. Kozlyakov, K. O. Nikolaev, J. V. Shepeleva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 225 (1). – P. 012255.

**References**

1. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.- prakt. konf. (g. Penza, 14 marta 2018 g.)* [Information technology in science and education. Problems and prospects: proceedings of the All-Russian intercollegiate scientific and practical conference (Penza, March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 256–258. [In Russian]
2. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.- prakt. konf. (g. Penza, 14 marta 2018 g.)* [Information technology in science and education. Problems and prospects: proceedings of the All-Russian intercollegiate scientific and practical conference (Penza, March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, 258 p. [In Russian]
3. Lashkova N. A., Permyakov N. V., Maksimov A. I., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Physics and mathematics sciences]. 2015, no. 1 (213), pp. 31–42. [In Russian]
4. Untila G. G., Kost T. N., Chebotareva A. B., Timofeev M. A. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor physics and technology]. 2012, vol. 46, no. 7, pp. 984–990. [In Russian]
5. Kondrashin V. I., Metal'nikov A. M., Pecherskaya R. M., Solov'ev V. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium “Safety and quality”]. 2014, vol. 2, pp. 147–148. [In Russian]
6. Birkina N. I. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu prakticheskikh rabot distsipliny khimiya* [Methodical recommendations for carrying out practical work in the discipline of chemistry]. Rostov-on-Don, 2015, 48 p. [In Russian]
7. Dolgov V. V., Ovanesov E. N., Shchetnikov K. A. *Fotometriya v laboratornoy praktike* [Photometry in laboratory practice]. Moscow: Rossiyskaya meditsinskaya akademiya posle diplomnogo obrazovaniya. 2004, vol. 103. [In Russian]
8. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Artamonov D. V. *AIMS Materials Science*. 2019, vol. 6 (2), pp. 276–287. DOI 10.3934/mat.2019.2.276.
9. Naumov A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [University proceedings. Nonferrous-metals industry]. 2005, no. 4, pp. 12–17. [In Russian]
10. Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Kozlyakov A. S., Nikolaev K. O., Shepeleva J. V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 225 (1), p. 012255.

---

**Печерская Екатерина Анатольевна**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: peal@list.ru

**Зинченко Тимур Олегович**

аспирант, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: scar0243@gmail.com

**Pecherskaya Ekaterina Anatol'evna**

Doctor of engineering sciences, associate  
professor, head of the sub-department  
of information and measuring technology  
and metrology, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Zinchenko Timur Olegovich**

Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Кравцов Александр Николаевич***

кандидат технических наук, доцент,  
начальник кафедры метрологического  
обеспечения вооружения, военной  
и специальной техники, Военно-  
космическая академия имени  
А. Ф. Можайского (Россия,  
г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)

E-mail: kan1970@bk.ru

***Kravtsov Aleksandr Nikolaevich***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, head of the sub-department  
of metrological support of weapons,  
military and special equipment,  
Military Space Academy named  
after A. F. Mozhaysky (13 Zhdanovskaya  
street, St. Petersburg, Russia)

***Александров Владимир Сергеевич***

студент, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Nauka-fpите@mail.ru

***Aleksandrov Vladimir Sergeevich***

Student, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

***Бержинская Марина Викторовна***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационно-измерительной  
техники и метрологии, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mberj@mail.ru

***Berzhinskaya Marina Viktorovna***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of information  
and measuring technology and metrology,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Разработка технологии спрей-пиролиза для синтеза прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова / Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко, А. Н. Кравцов, В. С. Александров, М. В. Бержинская // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 92–103. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-7.

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА АНТЕННЫМ СОГЛАСУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НАСТРОЙКИ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Обеспечение в переходном режиме устойчивости информационно-управляющих систем антенными согласующими устройствами, являющимися многосвязными объектами управления, представляет собой непростую задачу. Приходится проводить исследования по выбору типа согласующего устройства, синтезу используемых измерителей и датчиков, мест их подключения, разработке алгоритма управления, обеспечивающего устойчивость системы. Цель работы – обеспечение устойчивости системы управления путем разработки алгоритма с автономным (раздельным) управлением элементами настройки.

*Материалы и методы.* Информационно-управляющая система антенным согласующим устройством с сосредоточенными параметрами элементов настройки представляет собой объект исследования. Предмет исследования – алгоритм управления и его математическое обеспечение. Использованы метод круговых диаграмм сопротивлений и проводимостей в декартовой системе координат из теории функций комплексных переменных и методика исследования функций на экстремум из математического анализа.

*Результаты.* Разработаны алгоритм работы и математическое обеспечение информационно-управляющей системы дискретным антенным согласующим устройством с сосредоточенными параметрами элементов настройки, обеспечивающие устойчивость всей системы управления благодаря автономности настройки по отдельным элементам.

*Выводы.* Полученные математические выражения, необходимые для проектирования и функционирования информационно-управляющей системы антенным согласующим устройством, позволяют определить исходя из значения коэффициента бегущей волны в антенном фидере текущие, минимальные и максимальные величины элементов настройки согласующего устройства на рабочей частоте радиостанции.

**Ключевые слова:** активные сопротивление и проводимость, алгоритм поразрядного уравнивания, коэффициент бегущей волны, коэффициент отражения, круговая диаграмма, область согласования, П-образное согласующее устройство, функция, экстремум.

D. Yu. Muromtsev, V. M. Zhukov

## ANTENNA-MATCHING-DEVICE-BASED INFORMATION AND CONTROL SYSTEM WITH CENTERED TUNING ELEMENTS

---

© Муромцев Д. Ю., Жуков В. М., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

**Abstract.**

*Background.* Ensuring the stability of information and control systems in the transition mode by antenna matching devices, which are multi-connected control objects, is a difficult task. It is necessary to conduct research on the choice of the matching device type, the synthesis of the meters and sensors used the places where they are connected, and the development of a control algorithm that ensures the system's stability. The purpose of the research is to ensure the stability of the control system by developing an algorithm with Autonomous (separate) control of configuration elements.

*Materials and methods.* The antenna-matching-device-based information and control system with centered tuning elements is an object of research. The subject of research is the control algorithm and its mathematical support. The method of circular diagrams of resistances and conductivities in a Cartesian coordinate system from the theory of functions of complex variables and the method of studying functions on an extremum from mathematical analysis are used.

*Results.* Developed algorithm and software of information control system of the discrete antenna-matching unit with the centered parameters of the tuning elements, ensuring stability of the whole control system through autonomy settings for individual elements.

*Conclusions.* The mathematical expression needed for design and operation of antenna-matching-device-based information and control system, to determine based on the values of the coefficient of a traveling wave in the antenna feeder, the current, minimum and maximum values of the tuning elements of the matching device at the operating frequency of the radio station.

**Keywords:** active resistance and conductivity, bit-by-bit balancing algorithm, traveling wave coefficient, reflection coefficient, pie chart, matching area, U-shaped matching device, function, extremum.

## Введение

Организация процесса управления антенным согласующим устройством (АСУ) информационно-управляющей системой (ИУС) имеет некоторые особенности. Кроме определения типа датчиков или измерителей, метода и алгоритма управления, в ИУС должно быть заложено математическое обеспечение расчета текущих и предельных величин элементов настройки АСУ, используемое в процессе настройки. При использовании вычислительных методов управления [1] с его помощью рассчитываются, устанавливаются и последующими циклами корректируются требуемые для точной настройки АСУ величины элементов настройки. В случаях применения поисковых [2] методов оно также необходимо для установки величин нерегулируемых, постоянных в процессе настройки элементов, для определения пределов изменения значений переменных элементов по диапазону частот. При координированных [2] методах управления математическое обеспечение помогает повысить точность, уменьшить время [3] настройки АСУ, определяя оптимальное направление движения ИУС на плоскости переменных параметров настройки [4] и обеспечивая ее устойчивость [5]. Если в радиостанции применены широкополосные квазирезонансные АСУ, то в ИУС используется математическое обеспечение синтеза многополюсных широкополосных согласующих цепей по заданным характеристикам [6], точность и полоса согласования которых ограничиваются интегральными соотношениями Фано.

### 1. Синтез алгоритма ИУС АСУ

В процессе проектирования подвижных и стационарных радиостанций разработчикам информационно-управляющих систем антенными согласующими устройствами приходится разрабатывать алгоритмы их работы с учетом математического обеспечения для расчета текущих и предельных (минимальных и максимальных) величин элементов настройки АСУ, исходя из того, что для обеспечения требуемой дальности связи количество разнотипных антенн может достигать десяти и более, а входные комплексные сопротивления антенн меняются в зависимости от местности, условий развертывания и погоды. Кроме того, разработчикам может быть не известна длина кабеля от радиопередатчика до коммутатора антенн на стационарных радиоцентрах.

Для учета этих обстоятельств и с целью сокращения времени и трудоемкости проектирования ИУС АСУ целесообразно принять следующие условия:

- входные комплексные сопротивления антенн на круговой диаграмме ограничить окружностью минимального коэффициента бегущей волны (КБВ) в фидере;
- производить расчет предельных величин органов настройки АСУ, используя это значение КБВ;
- выбирать схему антенного согласующего устройства таким образом, чтобы область согласования АСУ перекрывала эту окружность или совпадала с ней;
- если усилитель мощности радиопередатчика широкополосный, то для дополнительного подавления гармоник схему АСУ предпочтительнее строить по П-образной схеме фильтра низких частот.

На рис. 1 приведена схема П-образного согласующего устройства.

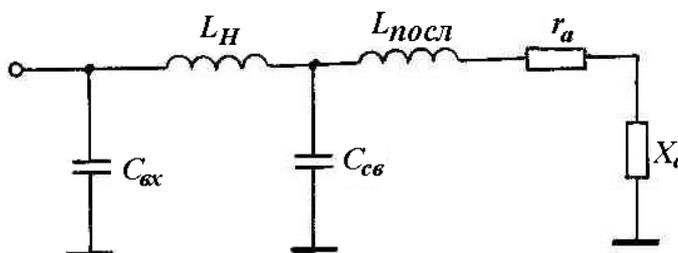


Рис. 1. П-образное согласующее устройство

Известен метод круговых диаграмм [7] в ортогональной (декартовой) системе координат, с помощью которого наглядно осуществляется анализ согласующих устройств и синтезируются алгоритмы работы их ИУС. Воспользуемся им для синтеза алгоритма работы ИУС АСУ и расчета предельных и текущих величин элементов настройки, применив его для согласующего устройства, показанного на рис. 1.

Будем использовать уравнения в ортогональных системах координат, описывающие на комплексных плоскостях сопротивлений и проводимостей окружности постоянной активной проводимости, постоянной реактивной проводимости, постоянного активного сопротивления, постоянного реактивного сопротивления и постоянного коэффициента бегущей волны.

На ортогональной комплексной плоскости сопротивлений уравнения записываются следующим образом.

Уравнение  $g$ -окружности:

$$\left(R - \frac{1}{2g}\right)^2 + x^2 = \left(\frac{1}{2g}\right)^2. \quad (1)$$

Уравнение  $b$ -окружности:

$$R^2 + \left(x + \frac{1}{2b}\right)^2 = \left(\frac{1}{2b}\right)^2. \quad (2)$$

Уравнение постоянного КБВ  $k$ :

$$\left(R - \frac{1+k^2}{2k}\right)^2 + x^2 = \left(\frac{1-k^2}{2k}\right)^2. \quad (3)$$

Уравнения  $R$ -,  $x$ - и  $k$ -окружности на ортогональной комплексной плоскости проводимостей соответственно выглядят так:

$$\left(g - \frac{1}{2R}\right)^2 + b^2 = \left(\frac{1}{2R}\right)^2, \quad (4)$$

$$g^2 + \left(b + \frac{1}{2x}\right)^2 = \left(\frac{1}{2x}\right)^2, \quad (5)$$

$$\left(g - \frac{1+k^2}{2k}\right)^2 + b^2 = \left(\frac{1-k^2}{2k}\right)^2, \quad (6)$$

где КБВ обозначен через  $k$ , а активные и реактивные сопротивления, проводимости ( $R, x, g, b$ ) нормированы по отношению к волновому сопротивлению кабеля между усилителем и АСУ. Данное положение касается всех последующих уравнений и выражений.

Необходимо отметить, что область согласования АСУ на круговой диаграмме сопротивлений в ортогональных координатах (рис. 2) должна находиться внутри окружности  $k_0$ , представляющей собой окружность минимально возможной величины КБВ в антенно-фидерном тракте.

Круговые диаграммы являются хорошим инструментом представления алгоритмов работы управляющих систем в процессе настройки АСУ и определения математических выражений, по которым ИУС регулирует величины элементов настройки АСУ.

Чаще всего в ИУС радиостанций высокочастотных и очень высокочастотных диапазонов АСУ настраиваются по показаниям датчика модуля комплексного сопротивления и датчика фазы, подключенных на входе согласующего устройства. Система управления оказывается многосвязной и для обеспечения сходимости ее к точке настройки (устойчивости в переходном режиме) приходится затрачивать больше временных и аппаратных ресурсов [3–5].

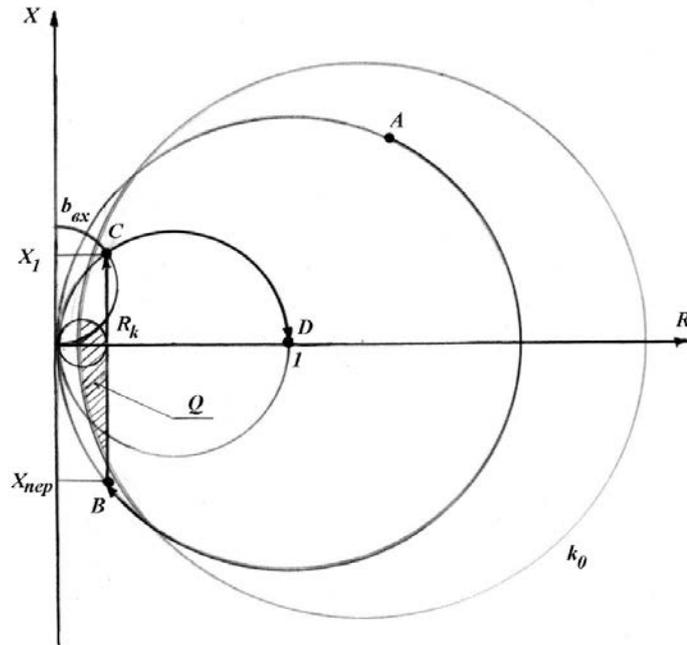


Рис. 2. Круговая диаграмма сопротивлений в ортогональных координатах

Предлагается алгоритм управления П-образным согласующим устройством с использованием трех датчиков – датчика фазы, датчика активной составляющей комплексной проводимости, датчика активной составляющей комплексного сопротивления [8], подключенных ко входу АСУ и обеспечивающих автономное, раздельное управление элементами настройки.

Рассмотрим поисковый алгоритм работы ИУС П-образным АСУ на круговой диаграмме сопротивлений (рис. 2). На ортогональных круговых диаграммах сопротивлений (рис. 2) и проводимостей (рис. 3) кривая  $ABCD$  представляет собой траекторию изменения импеданса антенны в процессе автоматической настройки АСУ при последовательной регулировке элементов настройки автономными кольцами управления.

Полагаем, что перед началом настройки у всех элементов установлено минимальное значение величин. Увеличению  $C_{CB}$  по показаниям датчиков фазы и активного сопротивления соответствует траектория  $AB$ , увеличению  $L_H$  по показаниям датчика фазы и активной проводимости – траектория  $BC$ , увеличению  $C_{BX}$  по показаниям датчика фазы – траектория  $CD$ . Установка требуемых величин переменных элементов производится алгоритмом поразрядного уравнивания до младшего разряда. Каждый двоичный разряд элемента настройки используется только один раз, что обеспечивает устойчивость системы управления. Как следует из диаграмм, отдельные кольца последовательного управления элементами настройки автономны, т.е. не зависят друг от друга. Поскольку величина  $C_{BX}$  вычисляется и устанавливается ИУС постоянной при каждой перестройке по частоте, траектория  $CD$  выполняется автоматически в процессе управления индуктивностью настройки  $L_H$  (траектория  $BC$ ). Получается траектория  $BCD$ .

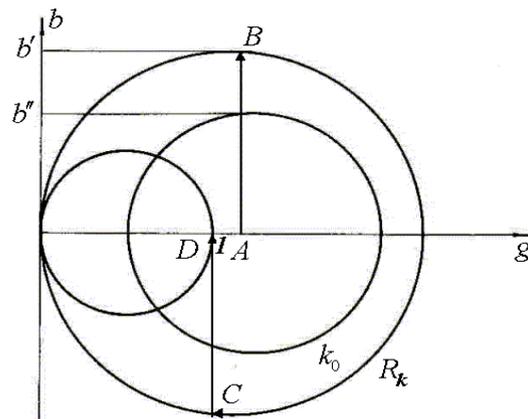


Рис. 3. Круговая диаграмма проводимостей в ортогональных координатах

В процессе управления процессом настройки П-образного АСУ информационно-управляющей системе требуется определять на каждой частоте текущие  $C_{BX}$  и предельные (минимальные и максимальные) величины  $C_{CB}$  и  $L_H$ . Необходимость сохранения постоянной проводимости входной емкости следует из рис. 2. Вычисление предельных величин переменных элементов настройки необходимо для определения числа их двоичных разрядов и величины минимального младшего разряда на данной частоте.

## 2. Разработка математического обеспечения ИУС

Разработаем методику вычисления предельных величин органов настройки П-образного АСУ на сосредоточенных элементах – индуктивностях и емкостях, используя выражения (1)–(6).

На рис. 4 показана эквивалентная схема изображенного на рис. 1 АСУ. Приняты обозначения:  $r$  – активное сопротивление внутренних потерь АСУ;  $R_{BH}$  – внесенное из антенны в АСУ активное сопротивление;  $x_{пер}$  – внесенное из антенны в АСУ реактивное сопротивление;  $x_H$  – реактивное сопротивление катушки;  $C_{вх}$  – емкость элемента настройки на входе АСУ.

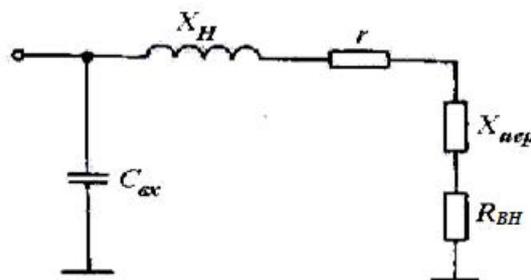


Рис. 4. Эквивалентная схема П-образного АСУ

Контурное суммарное активное сопротивление равно:

$$R_k = R_{BH} + r .$$

В процессе определения выражений для расчета величин элементов настройки антенного согласующего устройства следует руководствоваться следующими соображениями:

1. Область согласования П-образного АСУ тем шире, чем меньше  $R_k$ , что следует из рис. 2.

2. Для того чтобы область значений всех входных сопротивлений антенн попала в зону согласования АСУ, величину  $R_{BH}$  необходимо выбирать из расчета выполнения условия  $R_k \leq k_0$ , имея при этом ввиду, что контурный ток не должен превышать предельную величину, заданную в технических условиях на коммутирующие элементы. Величина контурного тока находится из выражения

$$I = \sqrt{\frac{P}{R_{BH} + r}} = \sqrt{\frac{P}{R_k}}, \quad (7)$$

где  $P$  – подводимая к контуру мощность.

3. Для антенных согласующих устройств большое значение имеет его собственный КПД, который определяется выражением

$$\eta = \frac{R_{BH}}{R_{BH} + r} = \frac{R_{BH}}{R_k}, \quad (8)$$

КПД должен быть максимально высоким.

Значение  $R_{BH}$  определяется из анализа уравнений (7) и (8) с учетом минимально возможной величины КБВ в антенно-фидерном тракте  $k_0$ .

На некоторых частотах ИУС приходится дополнительно подключать в антенну последовательную индуктивность  $L_{\text{посл}}$ , так как получающееся значение  $R_{BH}$  может оказаться таким, что зона  $Q$  (рис. 2) окажется вне области согласования АСУ.

При  $R_k = \text{const}$   $b_{вх}$  на оси ординат также не изменяется с изменением нагрузки АСУ.

Сохранение проводимости входного элемента в диапазоне частот постоянной обеспечивает независимость контурного тока и КПД АСУ от изменения входного комплексного сопротивления антенны и позволяет настраивать его двумя элементами  $L_H$  и  $C_{CB}$ .

Из уравнения (4) определяется проводимость  $b_{BX}$  при  $R = R_k$  и  $g = 1$ :

$$b_{BX} = \sqrt{\frac{1 - R_k}{R_k}}. \quad (9)$$

В реактивное сопротивление индуктивности  $L_H$  настроенного АСУ (рис. 2) входят два сопротивления:

$$x_H = |x_{\text{пер}}| + x_1.$$

Определяется оно следующим образом.

Из уравнения (1) при  $R = R_k$  и  $g = k_0$  находится максимальное значение  $x_{\text{пер}}$ :

$$x_{nep_{\max}} = -\sqrt{\frac{R_k}{k_0} - R_k^2}. \quad (10)$$

Из уравнения (1) при  $R = R_k$  и  $g = 1$  находится величина положительного реактивного сопротивления  $x_1$ :

$$x_1 = \sqrt{R_k - R_k^2}. \quad (11)$$

Следовательно, максимальная величина сопротивления катушки индуктивности, необходимая для настройки АСУ, равна

$$x_{H_{\max}} = \sqrt{\frac{R_k}{k_0} - R_k^2} + \sqrt{R_k - R_k^2}. \quad (12)$$

На верхней частоте диапазона величина сопротивления минимального значения индуктивности катушки  $L_{H_0}$  не должна превышать  $x_1$ . Такое ограничение следует из постоянства проводимости  $b_{BX}$  в процессе настройки АСУ и следует из рис. 2.

Максимальная и минимальная величины  $b_{CB}$  находятся следующим образом.

Максимальное значение величины проводимости емкости связи АСУ с нагрузкой равно максимальному значению функции:

$$F_1(g) = b'(g) + b''(g). \quad (13)$$

Это поясняется диаграммой проводимостей (рис. 3).

При  $R = R_k$  из уравнения (4) находится выражение для  $b'(g)$ :

$$b'(g) = \sqrt{\frac{g}{R_k} - g^2}. \quad (14)$$

Из уравнения (6) при  $k = k_0$  получим выражение для  $b''(g)$ :

$$b''(g) = \sqrt{\frac{g(1+k_0^2)}{k_0} - g^2} - 1. \quad (15)$$

Для того чтобы определить максимальную величину проводимости  $b_{CB}$ , нужно исследовать функцию  $F_1(g)$  на экстремум [9].

Максимум функции получается при значении:

$$g_1 = \frac{1}{R_k(1-k_0^2) + k_0}. \quad (16)$$

Формула для определения максимального значения  $b_{CB}$  получается путем преобразований (16), (14) и (15) с учетом (13):

$$b_{CB_{\max}} = \sqrt{\frac{1-R_k \cdot k}{R_k \cdot k}}. \quad (17)$$

С использованием рис. 3 определяется  $b_{CB_{\min}}$ , равное минимуму значения функции:

$$F_2(g) = b'(g) - b''(g), \quad (18)$$

где  $b'(g)$  и  $b''(g)$  определяются выражениями (14) и (15).

Минимум значения функции  $F_2(g)$  получается при

$$g_2 = \frac{k_0^2}{k_0 - R_k(1 - k_0)}. \quad (19)$$

Формула минимального значения проводимости  $C_{CB}$  получается подстановкой (19) в (14), (15) с учетом (18):

$$b_{CB_{\min}} = \frac{\sqrt{k_0 - R_k} [\sqrt{k_0} - (1 - k_0)\sqrt{R_k}]}{k_0 - R_k(1 - k_0)}. \quad (20)$$

### **Заключение**

С помощью полученных математических выражений можно определить, исходя из значения КБВ, текущие, минимальные и максимальные величины элементов настройки АСУ, необходимые для функционирования ИУС АСУ. Алгоритм работы ИУС поискового типа с автономным, отдельным управлением отдельными элементами настройки АСУ обеспечивает устойчивость всей системы управления в переходном режиме.

### **Библиографический список**

1. **Ермолаев, В. В.** Сокращение времени настройки цифрового автоматического согласующего устройства с помощью вычислительного метода / В. В. Ермолаев, В. М. Жуков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19. – С. 544–553.
2. **Кнеллер, В. Ю.** Принципы построения и вопросы теории преобразователей параметров комплексных величин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Кнеллер В. Ю. – Москва, 1971. – 32 с.
3. **Фарафонов, В. П.** Быстродействующая электронная система автонастройки контура с использованием цифроаналогового интегратора / В. П. Фарафонов, В. П. Волков // Техника средств связи. Серия: Техника радиосвязи. – 1976. – № 3. – С. 34–39.
4. **Белоусов, Е. Л.** Метод построения линий переключения антенного согласующего устройства / Е. Л. Белоусов, В. П. Волков // Техника средств связи. Серия: Техника радиосвязи. – 1976. – № 3. – С. 47–52.
5. **Волков, В. П.** Повышение устойчивости двумерной нелинейной системы авторегулирования при помощи корректирующего звена / В. П. Волков // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника радиосвязи. – 1970. – № 6.
6. **Девятков, Г. Н.** Автоматизированный синтез широкополосных согласующих устройств : дис. ... д-ра техн. наук / Девятков Г. Н. – Новосибирск : НГТУ, 2006. – 424 с.
7. **Борисов, В. В.** Анализ работы автоматического антенного согласующего устройства методом круговых диаграмм / В. В. Борисов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника радиосвязи. – 1970. – № 6. – С. 54–60.

8. **Жуков, В. М.** Применение моста переменного тока для реализации датчиков и измерителей используемых в системах автоматической настройки согласующих устройств / В. М. Жуков // Антенны. – 2010. – № 11 (162). – С. 23–27.
9. **Зорич, В. А.** Математический анализ / В. А. Зорич. – Москва : МЦНМО, 2012. – 702 с.

### References

1. Ermolaev V. V., Zhukov V. M. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2013, vol. 19, pp. 544–553. [In Russian]
2. Kneller V. Yu. *Printsipy postroeniya i voprosy teorii preobrazovateley para-metrov kompleksnykh velichin: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Principles of construction and questions of the converters parameters' theory of complex quantities: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences]. Moscow, 1971, 32 p. [In Russian]
3. Farafonov V. P., Volkov V. P. *Tekhnika sredstv svyazi. Seriya: Tekhnika radiosvyazi* [Communication equipment. Series: Radio communication technology]. 1976, no. 3, pp. 34–39. [In Russian]
4. Belousov E. L., Volkov V. P. *Tekhnika sredstv svyazi. Seriya: Tekhnika radiosvyazi* [Communication equipment. Series: Radio communication technology]. 1976, no. 3, pp. 47–52. [In Russian]
5. Volkov V. P. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika radiosvyazi* [Radio electronics issues. Series: Radio communication technology]. 1970, no. 6. [In Russian]
6. Devyatkov G. N. *Avtomatizirovannyi sintez shirokopolosnykh soglasuyushchikh ustroystv: dis. d-ra tekhn. nauk* [Automated synthesis of broadband matching devices: dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences]. Novosibirsk: NGTU, 2006, 424 p. [In Russian]
7. Borisov V. V. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika radiosvyazi* [Radio electronics issues. Series: Radio communication technology]. 1970, iss. 6, pp. 54–60. [In Russian]
8. Zhukov V. M. *Antenny* [Antennas]. 2010, no. 11 (162), pp. 23–27. [In Russian]
9. Zorich, V. A. *Matematicheskiy analiz* [Mathematical analysis]. Moscow: MTsNMO, 2012, 702 p. [In Russian]

---

#### **Муромцев Дмитрий Юрьевич**

доктор технических наук, профессор,  
проректор по инновационной и научной  
деятельности, Тамбовский  
государственный технический  
университет (Россия, г. Тамбов,  
ул. Советская, 106)

E-mail: mdjur@mail.ru

#### **Muromtsev Dmitriy Yur'evich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
Vice-rector for innovation and research,  
Tambov State Technical University  
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

#### **Жуков Валентин Михайлович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра конструирования  
радиоэлектронных и микропроцессорных  
систем, Тамбовский государственный  
технический университет (Россия,  
г. Тамбов, ул. Советская, 106)

E-mail: zhukov.val3ntin@yandex.ru

#### **Zhukov Valentin Mikhailovich**

Candidate of engineering sciences,  
associate professor, sub-department  
of radioelectronic and microprocessor  
systems, Tambov State Technical University  
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

**Образец цитирования:**

Муромцев, Д. Ю. Информационно-управляющая система антенным согласующим устройством с сосредоточенными элементами настройки / Д. Ю. Муромцев, В. М. Жуков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 104–114. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-8.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ОТ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В $\Sigma T$ -АЦП

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Наибольшими линейностью функции преобразования и разрядностью выходного кода сегодня обладают преобразователи информации  $\Sigma\Delta$ -архитектуры. Однако наличие в их структуре цифрового фильтра-дециматора не позволяет реализовать привязку результата измерения ко времени измерения. Для обеспечения этого важнейшего свойства преобразователей информации  $\Sigma$ -архитектуры для измерительных задач целесообразно использовать другие виды промежуточной модуляции, например широтно-импульсную модуляцию. Проводится сравнительный анализ алгоритмов интегрирующего  $\Sigma T$  аналого-цифрового преобразователя (АЦП), в которых с целью исключения цифровой фильтрации выходного сигнала модулятора промежуточный широтно-импульсный модулированный сигнал суммируется в примыкающих циклах преобразования за время, во много раз превышающее период импульсной модуляции, а для исключения операции фильтрации результатов промежуточного модулирования используется компенсация погрешности от краевых эффектов. Исследования проведены с помощью разработанных имитационных моделей, в которых используются аналоговый, комбинированный и цифровой способы компенсации погрешности от краевых эффектов.

*Материалы и методы.* Созданы имитационные модели в программной среде Matlab/Simulink. Проведен ряд модельных экспериментов и рассчитаны значения среднеквадратичной погрешности линейности функции преобразования АЦП без компенсации, а также с аналоговой, комбинированной и цифровой компенсацией погрешности от краевых эффектов соответственно. Дана оценка работоспособности алгоритмов и проведен сравнительный анализ реализованных алгоритмов.

*Результаты.* Показатели среднеквадратичной погрешности линейности подтверждают корректность реализации алгоритмов в программной среде и эффективность имитационных моделей  $\Sigma T$ -АЦП с аналоговой, комбинированной и цифровой компенсацией погрешности от краевых эффектов.

*Выводы.* Реализованный алгоритм  $\Sigma T$ -АЦП с цифровой компенсацией значительно уменьшает погрешность от краевых эффектов, что подтверждается полученными значениями среднеквадратичной погрешности линейности, и является наиболее простым с точки зрения модельной и практической реализации.

**Ключевые слова:**  $\Sigma T$ -АЦП, широтно-импульсная модуляция, аналоговая компенсация, цифровая компенсация, комбинированная компенсация, коррекция, погрешность от краевых эффектов, имитационная модель, среднеквадратичное отклонение результатов преобразования.

## SIMULATION RESULTS ANALYSIS OF METHODS TO COMPENSATE ERRORS CAUSED BY BOUNDARY EFFECTS IN $\Sigma T$ -ADC

### Abstract.

*Background.* The greatest linearity of a conversion function and word length of an output code information converters with  $\Sigma\Delta$ -architecture have today. However, existence in their structure of the digital filter-decimater does not allow realizing a binding of result of measurement by the time of measurement. To ensure this most important property of information converters  $\Sigma$ -architecture for measuring tasks, it is advisable to use other types of intermediate modulation, for example, pulse-width modulation (PWM). A comparative analysis of the algorithms of the integrating  $\Sigma T$  analog-digital converter (ADC) is carried out, in which, in order to eliminate digital filtering of the output signal of the modulator, an intermediate pulse-width modulated signal is summed in adjacent conversion cycles for a time that is many times longer than the pulse modulation period. To exclude the operation of filtering the results of intermediate modulation, the error compensation from edge effects is used. Researches were carried out using the developed simulation models, which use analog, combined and digital methods for compensating the error from edge effects.

*Materials and methods.* Simulation models were created in the Matlab/Simulink software environment. A number of model experiments have been carried out and the values of the standard deviation of linearity of the ADC conversion function without compensation, as well as with analog, combined, and digital compensation of the error from edge effects, are calculated. The performance of the algorithms is assessed and a comparative analysis of the implemented algorithms is carried out.

*Results.* The indices of the standard deviation of linearity confirm the correctness of the implementation of the algorithms in the software environment and the effectiveness of the simulation models of the  $\Sigma T$ -ADC with analog, combined and digital compensation of the error from edge effects.

*Conclusions.* The implemented  $\Sigma T$ -ADC algorithm with digital compensation significantly reduces the error from edge effects, which is confirmed by the obtained values of the standard deviation of linearity, and is the simplest from the point of view of model and practical implementation.

**Keywords:**  $\Sigma T$ -ADC, pulse-width modulation, analog compensation, digital compensation, combined compensation, correction, error from edge effects, simulation model, standard deviation of conversion results.

### Введение

Большинству известных алгоритмов  $\Sigma T$  аналого-цифрового преобразователя (АЦП), реализующих промежуточную импульсную модуляцию входного сигнала  $u_x$  в интервал времени  $T_i$  с последующим суммированием результатов преобразования примыкающих частных циклов, присуща методическая составляющая погрешности от краевых эффектов, которая вызвана неравенством длительности полного цикла преобразования и длительности суммы частных циклов из-за асинхронности частных и полных циклов [1, 2]. С целью исключения данной составляющей погрешности преобразования предложены структурно-алгоритмические методы их компенсации – аналоговый, цифровой, комбинированный (аналого-цифровой) [3–6]. Все три метода получили свою реализацию в виде имитационных Simulink-моделей. В част-

ности, в работе [7] приведены результаты имитационного моделирования одной из моделей, реализующих цифровую компенсацию погрешности от краевых эффектов, модель с аналоговой компенсацией рассмотрена в работе [8], а модель с комбинированной – в [9].

### Сравнительный анализ способов компенсации погрешности от краевых эффектов в $\Sigma T$ -АЦП

Все три алгоритма компенсации реализованы в программной среде Matlab/Simulink: модель интегрирующего  $\Sigma T$ -АЦП с комбинированной компенсацией погрешности от краевых эффектов показана на рис. 1, аналоговой компенсацией – на рис. 2, цифровой – на рис. 3. Проведенные исследования линейности функции преобразования показали, что все  $\Sigma T$ -АЦП с предложенными структурно-алгоритмическими методами компенсации погрешности от краевых эффектов функционируют корректно.

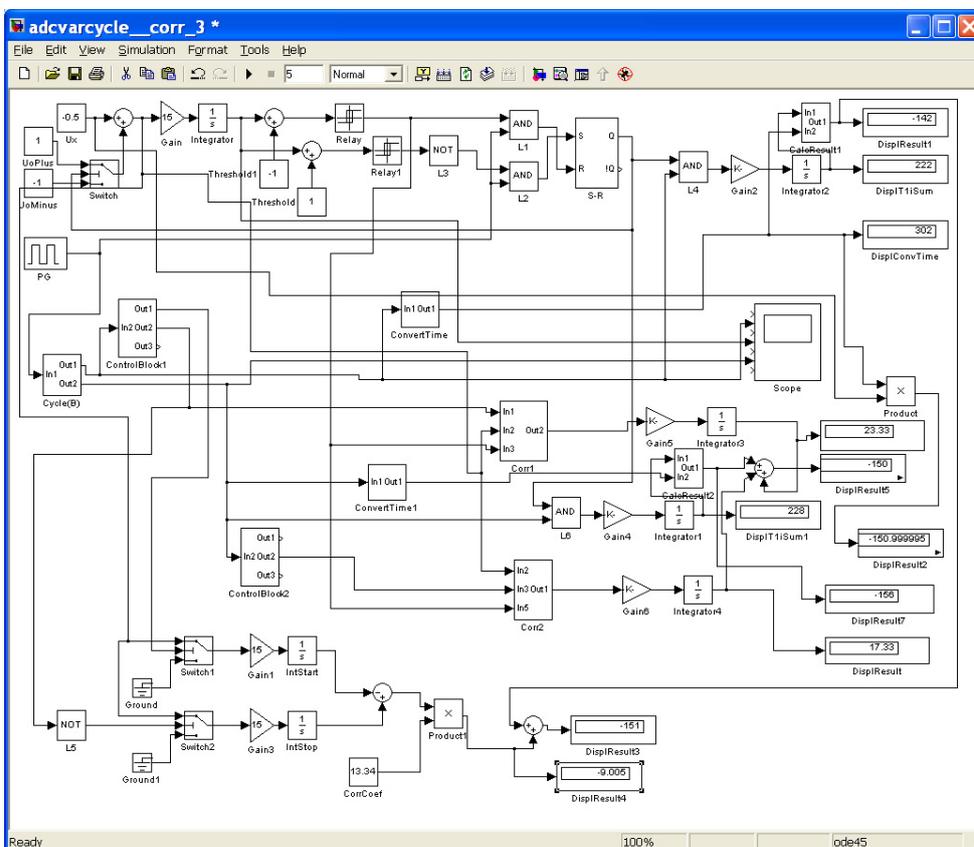


Рис. 1. Simulink-модель  $\Sigma T$ -АЦП с комбинированной коррекцией

Все разработанные модели  $\Sigma T$ -АЦП имеют конечную длительность полного цикла преобразования, который состоит из частных циклов. Частные циклы «усредняют» результат преобразования. Чем больше частных циклов в полном цикле, тем точнее результат преобразования, тем, естественно, меньше влияние погрешности от краевых эффектов на результат преобразо-

вания. Однако при этом увеличивается время преобразования, уменьшается быстродействие преобразователя. За длительность каждого цикла (как полного, так и частного) умещается множество кодирующих импульсов. Количество кодирующих импульсов зависит от разрядности проектируемого преобразователя информации, частоты опорного генератора.

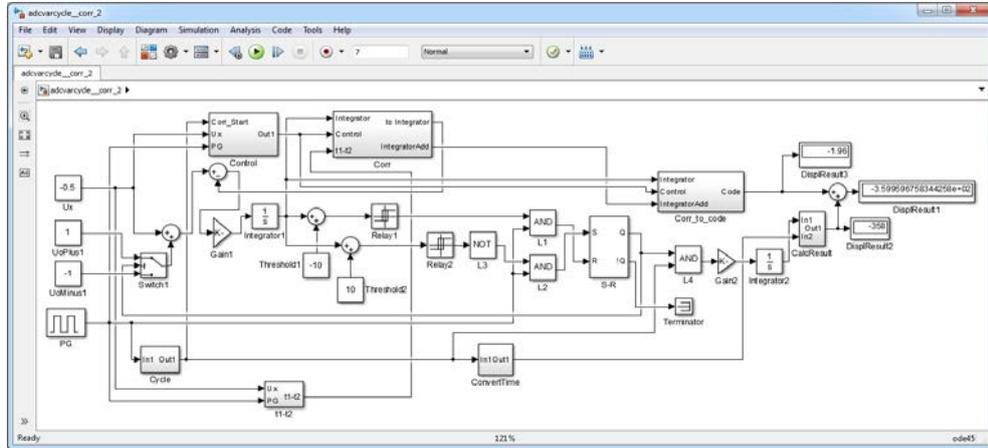


Рис. 2. Simulink-модель  $\Sigma T$ -АЦП с аналоговой коррекцией

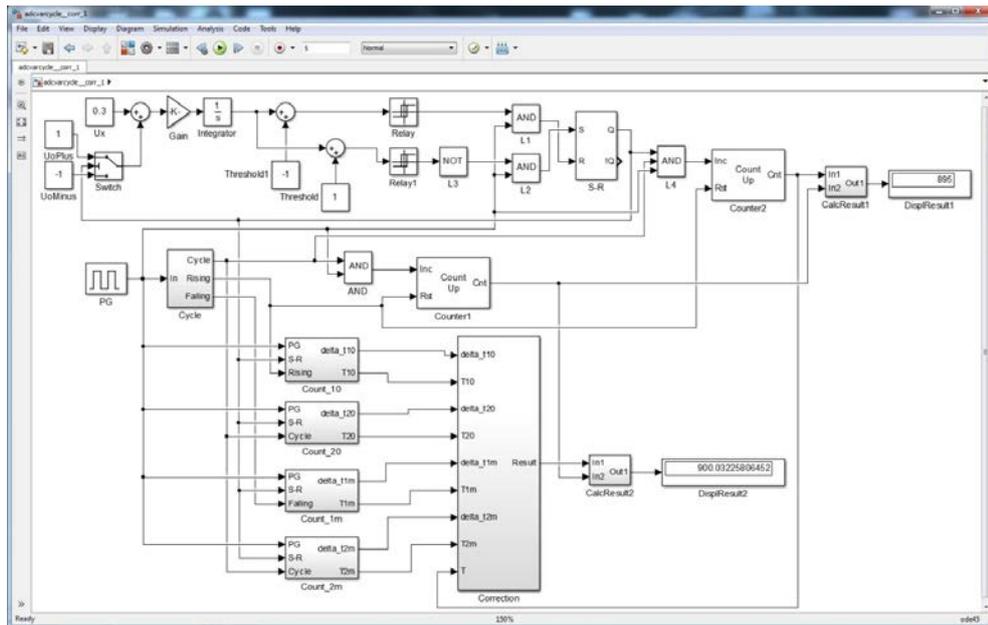


Рис. 3. Simulink-модель  $\Sigma T$ -АЦП с цифровой коррекцией

Исследования показали, что для оценки эффективности алгоритма компенсации погрешности от краевых эффектов целесообразно при реализации полного цикла преобразования модели в  $\Sigma T$ -АЦП установить не более 10 частных циклов. Поэтому модели разработаны таким образом, что полный цикл преобразования содержит 10 частных циклов, а скачку входного постоянного напряжения  $0 \rightarrow 1$  В соответствовало выходное значение на дисплее

$2^{16}$  кодирующих импульсов. Для оценки линейности функции преобразования модели снимались показания результатов преобразования на дисплеях при линейном изменении дискретных значениях входного напряжения с шагом 50 мВ. Полученные результаты преобразования обрабатывались по известной формуле оценки среднего квадратичного отклонения результатов измерений:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}},$$

где  $x_i$  –  $i$ -й элемент выборки;  $n$  – объем выборки;  $\bar{x}$  – среднее арифметическое выборки.

Полученные значения среднеквадратичной погрешности линейности преобразования в единицах младшего значащего разряда сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты модельных экспериментов

Тип компенсации	Значение погрешности без компенсации	Значение погрешности с компенсацией
Комбинированная	1,5398	0,0317
Аналоговая	0,7239	0,2353
Цифровая	62,4417	0,0919

### Заключение

С точки зрения моделирования в программной среде Matlab/Simulink модель с аналоговой коррекцией погрешности наиболее сложная. Сложности также могут возникнуть и при реализации преобразователя «в железе», поскольку алгоритм основан на реализации глубокой отрицательной обратной связи в контуре интегрирования. При реализации интегрирующего АЦП по интегральной технологии реализации узла коррекции погрешности от краевых эффектов в аналоговом виде на точность преобразования будут оказывать статические и динамические параметры аналоговых элементов.

Модель с комбинированной компенсацией погрешности показала хорошие результаты, однако алгоритм также весьма сложный с точки зрения реализации. Комбинированная компенсация осуществляется введением в структуру интегрирующего АЦП дополнительного малоразрядного аналого-цифрового преобразователя, линейность преобразования которого влияет на линейность функции преобразования всего устройства.

Модель с цифровой компенсацией показала лучшие результаты, уменьшив погрешность линейности преобразования более чем в 679 раз. При этом алгоритм является наиболее простым с точки зрения модельной и практической реализации, поскольку предполагает введение лишь нескольких дополнительных цифровых блоков, таких как логические элементы и счетчики. С учетом возможностей современных нанотехнологий, ориентированных на цифровые технологии, данный алгоритм наиболее перспективен при реализации по интегральной технологии. В силу этого предложенная авторами

структура и алгоритм преобразования интегрирующего АЦП защищены патентом РФ на изобретение [10].

**Библиографический список**

1. **Шахов, Э. К.** Интегрирующие развертывающие преобразователи / Э. К. Шахов, В. Д. Михотин. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. **Ашанин, В. Н.** Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования : монография / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр, 2009. – 214 с.
3. Патент № 2303327 Российская Федерация. Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования напряжения / Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин. – БИ № 20. – 2007.
4. Патент № 2294595 Российская Федерация. Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования напряжения / Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин. – БИ № 6. – 2007.
5. Патент № 2292642 Российская Федерация. Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования напряжения / Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин. – БИ № 3. – 2007.
6. Патент № 2291559 Российская Федерация. Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования напряжения / Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин. – БИ №1. – 2007.
7. **Ашанин, В. Н.** Разработка интегрирующего  $\Sigma T$ -аналого-цифрового преобразователя с коррекцией погрешности от краевых эффектов в цифровой форме / В. Н. Ашанин, А. А. Коротков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3 (23). – С. 139–150.
8. **Ashinin, V. N.** Development of Sigma-T ADC with Analogue Compensation of Error Caused by Edge Effects / V. N. Ashinin, A. A. Korotkov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2017. – p. 5.
9. **Ashinin, V. N.** Research of the sigma-T analog-to-digital converter with combined compensating of the error from edge effects / V. N. Ashinin, A. A. Korotkov // 4th the International Conference on the Transformation of Education (London, U.K. 24–30 April 2016). – London, U.K., 2016. – P. 6–17.
10. Патент № 2725678 Российская Федерация. Интегрирующий аналого-цифровой преобразователь напряжения / В. Н. Ашанин, А. А. Коротков. – БИ № 19. – 2020.

**References**

1. Shakhov E. K., Mikhotin V. D. *Integriruyushchie razvertyvayushchie preobrazovateli* [Integrating unfolding converters]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
2. Ashinin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Teoriya integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya: monografiya* [Theory of integrating analog-digital conversion: a monograph]. Penza: Inf.-izd. tsentr, 2009, 214 p. [In Russian]
3. Patent № 2303327 Russian Federation. *Sposob integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya napryazheniya* [Method of integrating analog-digital voltage conversion]. E. K. Shakhov, V. N. Ashinin. Bull. no. 20, 2007. [In Russian]
4. Patent № 2294595 Russian Federation. *Sposob integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya napryazheniya* [Method of integrating analog-digital voltage conversion]. E. K. Shakhov, V. N. Ashinin. Bull. no. 6, 2007. [In Russian]
5. Patent № 2292642 Russian Federation. *Sposob integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya napryazheniya* [Method of integrating analog-digital voltage conversion]. E. K. Shakhov, V. N. Ashinin, B. V. Chuvykin. Bull. no. 3, 2007. [In Russian]

6. Patent № 2291559 Russian Federation. *Sposob integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya napryazheniya* [Method of integrating analog-digital voltage conversion]. E. K. Shakhov, V. N. Ashanin. Bull. no. 1, 2007. [In Russian]
7. Ashanin, V. N., Korotkov A. A. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society]. 2017, no. 3 (23), pp. 139–150. [In Russian]
8. Ashanin V. N., Korotkov A. A. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2017, p. 5.
9. Ashanin V. N., Korotkov A. A. *4th the International Conference on the Transformation of Education (London, U.K. 24–30 April 2016)*. London, U.K., 2016, pp. 6–17.
10. Patent № 2725678 Russian Federation. *Integriruyushchiy analogo-tsifrovoy preobrazovatel' napryazheniya* [Integrating analog-digital voltage converter]. V. N. Ashanin, A. A. Korotkov. Bull. no. 19, 2020. [In Russian]

---

***Ашанин Василий Николаевич***

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электроэнергетики  
и электротехники, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

***Ashanin Vasily Nikolaevich***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, head of the sub-department  
of electric power and electrical engineering,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

***Коротков Алексей Александрович***

инженер-конструктор, Научно-  
исследовательский институт  
электронно-механических приборов  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44);  
аспирант, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: lexifer@mail.ru

***Korotkov Aleksey Aleksandrovich***

Design engineer, Research Institute  
of Electronic and Mechanic Devices  
(44 Karakozova street, Penza, Russia);  
postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Ашанин, В. Н. Анализ результатов модельного исследования способов компенсации погрешности от краевых эффектов в  $\Sigma T$ -АЦП / В. Н. Ашанин, А. А. Коротков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 115–121. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-9.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

---

УДК 620.193

DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-10

*В. М. Кушнаренко, В. С. Репях, И. Ш. Тавтилов, С. Ю. Решетов*

## ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ МУФТ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются муфты насосно-компрессорных труб (НКТ). Предметом исследования являются металлографические исследования участков зарождения трещин в металле муфт. Цель работы – определение причин разрушения муфт НКТ в процессе эксплуатации.

*Материалы и методы.* Проведено исследование причин зарождения трещин в результате воздействия на муфты НКТ коррозионной среды и механических повреждений, возникших в процессе эксплуатации, а также анализ разрушений фрактографическими и металлографическими методами.

*Результаты.* Рассмотрены разрушения муфт НКТ при воздействии сероводородсодержащей среды, выявлена связь образования микротрещин с механическим воздействием на муфты и образованием вмятин-рисок от монтажно-го инструмента при достижении определенного момента свинчивания необходимого для образования герметичного резьбового соединения.

*Выводы.* Сопоставление рассматриваемых разрушений позволило сделать выводы, что основными причинами разрушений муфт НКТ являются концентраторы напряжений – вмятины-риски на внешних поверхностях муфт, воздействие нерегламентированных монтажных напряжений и сероводородсодержащей рабочей среды на области вмятин-рисок муфты приводит к появлению микротрещин водородного растрескивания в условиях сложного напряженного состояния.

**Ключевые слова:** разрушение, коррозионная среда, напряжение, муфта, насосно-компрессорная труба, химический состав, металлографическое исследование, микроструктура металла, растяжение, ударный изгиб, твердость.

*V. M. Kushnarenko, V. S. Repyakh, I. Sh. Tavtilov, S. Yu. Reshetov*

## CAUSES OF DAMAGES OF PUMP-COMPRESSOR PIPE CLUTCHES

### **Abstract.**

*Background.* The object of research is the clutch of pump-compressor pipes (tubing). The subject of the study is metallographic studies of the areas of crack

---

© Кушнаренко В. М., Репях В. С., Тавтилов И. Ш., Решетов С. Ю., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

origin in the metal of clutches. The purpose of this work is to determine the causes of damages of pump-compressor pipe clutch during operation.

*Materials and methods.* Investigation of the crack formation causes because of the impact on the tubing clutches of a corrosive environment and mechanical damage that occurred during operation, as well as analysis of fractographic and metallographic destruction methods.

*Results.* Considered the destruction of the clutches of the tubing when exposed gray-and-hydrogen-containing environment, correlation of microcracks with mechanical damages of the clutch and formation of dents-scratches from installation Toolkit when a certain torque is required for the formation of a sealed threaded connection.

*Conclusions.* Comparison of the considered fractures allowed us to conclude that the main causes of failure of tubing couplings are stress concentrators - dents-risks on the outer surfaces of the couplings. The impact of unregulated assembly stresses and a hydrogen sulfide-containing working medium on the area of the dents-marks of the coupling leads to the appearance of microcracks of hydrogen cracking under conditions of a complex stress state.

**Keywords:** damage, corrosion medium, stress, clutch, tubing, chemical composition, metallographic examination, metal microstructure, tension, impact bending, hardness.

## Введение

В процессе эксплуатации скважинного оборудования наблюдаются повреждения муфт насосно-компрессорных труб (НКТ) различного характера, которые наносят материальный и экологический ущерб [1]. Изучение опыта эксплуатации НКТ, процессов накопления повреждений в металле муфт НКТ, механизмов разрушения является необходимым условием повышения надежности эксплуатации скважинного оборудования. Ниже приведены типичные примеры разрушений муфт НКТ и установленные причины их разрушения.

**Цель работы** – определение причин разрушения муфт НКТ в процессе эксплуатации.

## Результаты исследований и их обсуждение

1. Разрушение муфты НКТ  $\text{Ø}73 \times 5,51$  мм (рис. 1). При визуальном измерительном контроле соединения муфты с НКТ  $\text{Ø}73$  мм получено: средний наружный диаметр муфты  $D_{ac} = 95,9$  мм; средняя толщина стенки муфты 8,2 мм. Навинченная муфта имеет продольную сквозную трещину (рис. 1,б-г). Величина раскрытия (ширина) трещины в сборе муфты с НКТ от 3,4 до 6,5 мм, в срединной части – 5,4 мм.

Обнаружена несоосность соединения муфты с НКТ (рис. 1,а). Кроме того, со стороны, противоположной трещине, торец муфты доходит до конца резьбовой части конца трубы, а со стороны трещины от торца трубы выступают две нитки резьбовой части. После развинчивания на свободном конце муфты раскрытие стало 4,5 мм, а на конце со стороны НКТ практически не изменилось, в середине муфты – уменьшилось на 0,3 мм. После принудительного сведения берегов трещины муфты средний наружный диаметр муфты  $D_{bc} = 94,1$  мм. На внешней поверхности муфты обнаружены многочисленные вмятины от монтажного ключа, глубина вмятин от 0,4 до 1,7 мм (рис. 1-3).

На нескольких витках, в особенности у расположенных ближе к торцам муфты, наблюдается деформация – смятие вершин ниток резьбы (рис. 1,г).

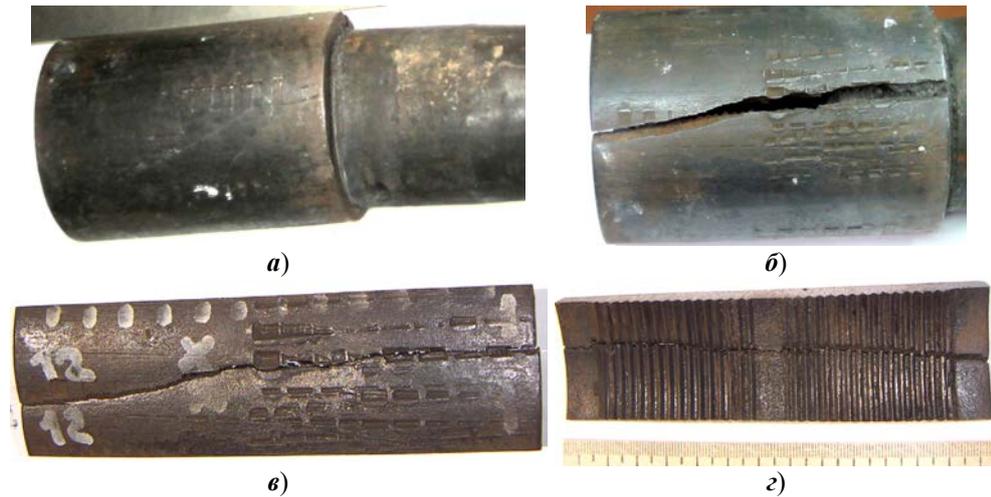


Рис. 1. Разрушение муфты НКТ  $\text{Ø}73 \times 5,51$  мм

При рассмотрении поверхности излома муфты (рис. 2) наблюдается хрупкий излом, что характерно для материала, эксплуатируемого в условиях повышенных напряжений и воздействия рабочих сред. Излом имеет многоочаговый характер, очаги находятся на поверхности муфты в области вмятин от гидравлического ключа. Рубцы излома направлены практически параллельно оси муфты и выходят на поверхность к вмятинам, где на расстоянии 21 и 66 мм от одного из торцов муфты находятся очаги излома. Поверхность излома имеет преимущественно волокнистое строение, местами напоминающее древесную структуру, а также хрупкий характер разрушения в очагах излома, от которых начинается трещина, которая развивалась попеременно в продольных плоскостях, где действуют максимальные окружные напряжения. Очаги расположены как в месте конструктивно максимальной толщины стенки муфты  $b = 9,1$  мм, т.е. практически посередине, где резьба на внутренней поверхности отсутствует, так и в резьбовой части, где толщина стенки муфты по впадине резьбы  $b = 7,8$  мм.

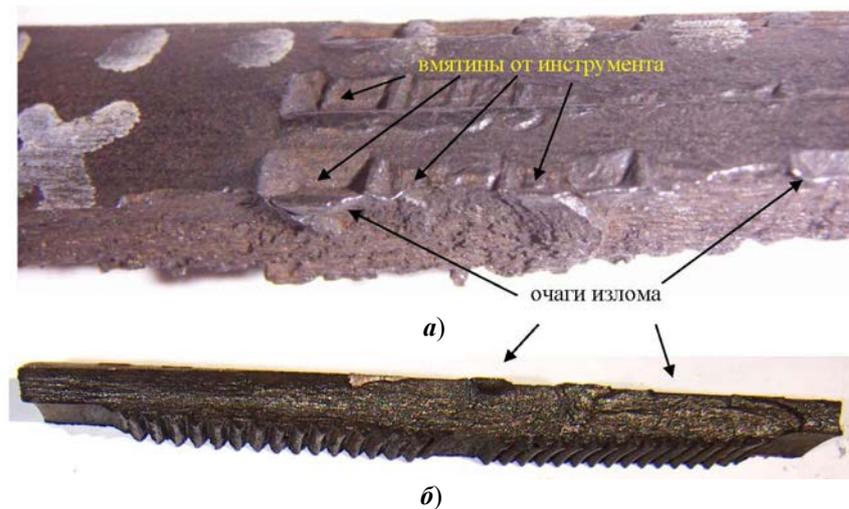


Рис. 2. Излом разрушенной муфты НКТ  $\text{Ø}73 \times 5,51$  мм

Проведенные металлографические исследования показывают наличие трещин в металле муфты. На рис. 3 показана трещина, развитие которой началось от одной из многочисленных вмятин, образованных от гидравлического ключа.

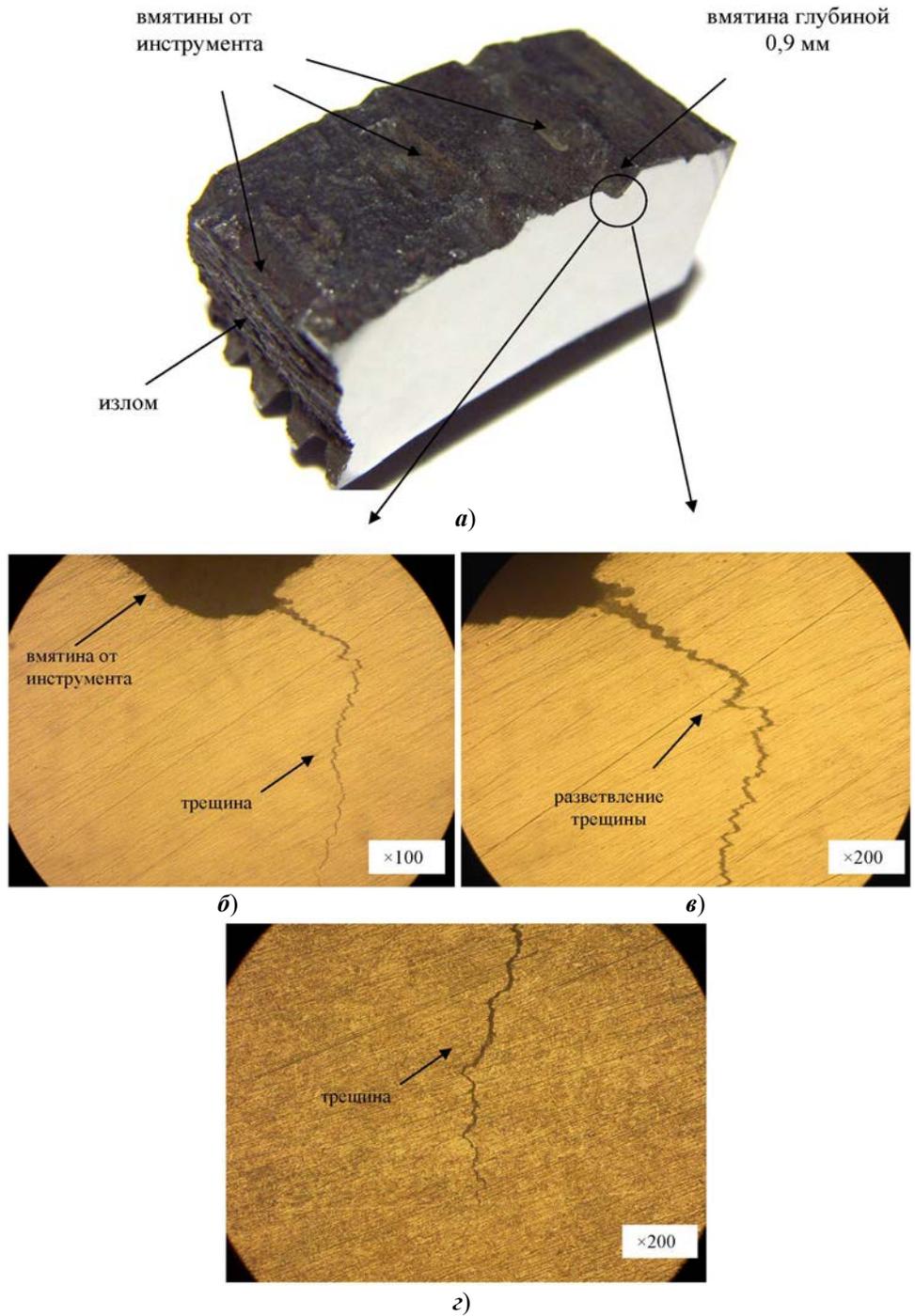


Рис. 3. Зарождение и развитие трещины от вмятины муфты НКТ Ø73×5,51 мм

Трещина распространяется от вмятины глубиной 0,9 мм в плоскости практически перпендикулярно оси муфты и даже имеет некоторое разветвление (рис. 3). Также имеет место распространение трещины от поверхности муфты в области вмятины глубиной 0,5 мм.

Согласно результатам спектрального анализа материал муфты соответствует стали типа 30Г2, что не превышает нормативных значений по ГОСТ 633 [2] для стали группы прочности  $D$  по сере и фосфору.

Твердость металла муфты составляет 17-24 HRC.

При создании герметичного соединения муфты с трубой посредством конического резьбового соединения в металле муфты возникают значительные окружные напряжения растяжения. Многочисленные вмятины от гидравлического ключа на поверхности муфты, а также замытие ниток резьбы, свидетельствует о значительном превышении момента затяжки резьбового соединения муфты с НКТ, приведшем к возникновению в металле муфты больших монтажных остаточных напряжений.

Рабочие напряжения в металле муфты от внутреннего давления среды при эксплуатации НКТ незначительны:

$$\sigma_p = \frac{p \cdot D}{2t_{cp}} = \frac{5,0 \cdot 94,1}{2 \cdot 8,2} = 28,7 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление рабочей среды, МПа;  $D$  – наружный диаметр муфты, мм;  $t_{cp}$  – средняя толщина стенки муфты, мм.

Даже с учетом максимальной концентрации напряжений от резьбы и вмятин  $\sigma_p = 28,7 \cdot 2 = 57,4$  МПа.

Ранее отмечалось, что разрушенная муфта НКТ имеет значительное раскрытие – в срединной части 5,4 мм. Это обусловлено релаксацией остаточных монтажных напряжений, вызванных существенным превышением момента затяжки резьбового соединения муфты с НКТ.

Величину остаточных напряжений в металле муфты определяли согласно ГОСТ Р 54918 [3] по формуле

$$\sigma_{ост} = \frac{Et_{cp} \left( \frac{1}{D_{bc}} - \frac{1}{D_{ac}} \right)}{1 - \nu^2} = 338,4 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга, равный  $2,069 \cdot 10^5$  МПа;  $t_{cp}$  – средняя толщина стенки муфты, равная 8,2 мм;  $D_{bc}$  – средний наружный диаметр муфты до нанесения надреза (трещины), равный 94,1 мм;  $D_{ac}$  – средний наружный диаметр муфты после нанесения надреза (возникновения трещины), равный 95,9 мм;  $\nu$  – коэффициент Пуассона, равный 0,28.

Наличие на внутренней поверхности муфты резьбы и на наружной поверхности муфты вмятин от гидравлического ключа вызывает концентрацию напряжений (от 1,5 до 2,0) [1], тогда окружные напряжения в металле муфты могут достигнуть величины 507,6 МПа.

Следовательно, остаточные монтажные окружные напряжения в металле муфты, превышающие даже без учета напряжений от рабочих нагрузок предел текучести металла муфты, равный согласно результатам испытаний на растяжение 469 МПа, привели к возникновению в местах концентраторов

напряжений (вмятин от гидравлического ключа) микротрещин с последующим сквозным разрушением муфты НКТ.

Причиной разрушения муфты НКТ являются концентраторы напряжений – вмятины от гидравлического ключа – и значительное превышение момента затяжки резьбового соединения муфты с НКТ, приведшее к возникновению в металле муфты монтажных остаточных напряжений, достигающих предела текучести металла.

2. Разрушение муфты НКТ Ø60,3 мм (рис. 4) произошло в виде продольной трещины при освоении сероводородсодержащей нефтегазовой скважины, в которой проводили соляно-кислотную обработку.

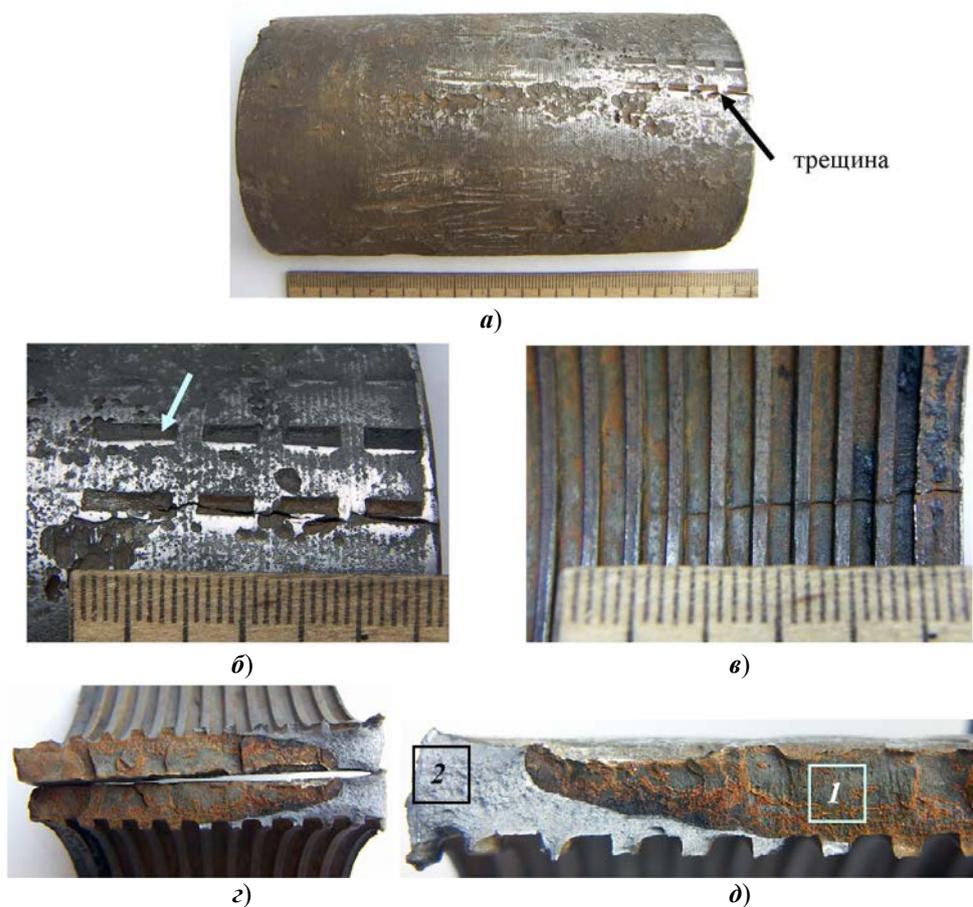


Рис. 4. Разрушенная муфта НКТ Ø60,3 мм: *а, б, в* – общий вид с трещиной (стрелками указаны вмятины от машинного ключа); *г, д* – участок разрушения муфты НКТ Ø60,3 мм после долома: *1* – зона хрупкого излома (траектория трещины), *2* – зона квазихрупкого долома

При визуальном осмотре наружной поверхности муфты на участках вмятин-рисок глубиной до 1,2 мм, оставшихся от машинного ключа, наблюдается трещина длиной 26 мм с раскрытием 0,2–0,3 мм (рис. 4, *а, б*). На наружной поверхности муфты наблюдаются также язвенные коррозионные поражения величиной от 1 до 10 мм, глубиной до 1,4 мм. На внутренней по-

верхности муфты трещина распространилась от торца муфты на расстояние 23 мм – до восьмого витка резьбы (рис. 4,б). На поверхности резьбы обнаружены заусенцы и смятие вершин отдельных витков резьбы (рис. 4,в).

Излом хрупкий, что характерно для материала муфты, эксплуатируемой в условиях повышенных напряжений и воздействия наводороживающих сред. Участок долома имеет квазихрупкий излом (рис. 4,з,д). При осмотре более 170 муфт и НКТ, извлеченных из скважины, на наружной поверхности 134 муфт и НКТ обнаружены многочисленные вмятины-риски от машинных ключей для раскрепления резьбовых соединений, а также коррозионные повреждения.

Согласно результатам спектрального анализа химический состав металла разрушенной муфты НКТ Ø60,3 мм соответствует стали 30ХМА.

Измеренная твердость металла муфты НКТ составляет 215–221 НВ, что соответствует требованиям стандарта NACE MR0175 [4], в котором максимальное значение твердости принято 229 НВ для стальных изделий, эксплуатирующихся в условиях воздействия сероводородсодержащих сред.

Испытания на растяжение образцов муфты НКТ Ø60,3 мм, вырезанных из резьбовой части муфты, показали: прочности  $\sigma_b = 693$  МПа, предел текучести  $\sigma_t = 562$  МПа, относительное удлинение  $\delta = 15$  %, что соответствует стали группы прочности Е по ГОСТ 633 [2].

Причиной разрушения муфты НКТ Ø60,3 мм являются вмятины-риски, оставшиеся от воздействия машинных ключей для раскрепления резьбовых соединений НКТ, от которых как от концентраторов напряжений в условиях воздействия наводороживающих сероводородсодержащих сред образовались микротрещины, объединившиеся затем в сквозную трещину.

**3.** Разрушение муфты НКТ Ø73×5,5 мм (рис. 5) произошло при эксплуатации в газо-нефтяной скважине с содержанием до 0,14 % H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub> до 1,56 %. При визуальном осмотре муфты наблюдается сквозное разрушение практически вдоль оси с раскрытием от 6,5 до 6,7 мм (рис. 5). На внешней поверхности муфты в области, прилегающей к сквозному разрушению, следы коррозии и вмятины от плашек гидроключа не обнаружены. Резьба на муфте и на соединяемых с нею резьбовыми концами НКТ имеет повреждение нитей. На торцевой поверхности муфты имеются вмятины, возникшие в процессе ловильных работ.

Излом муфты по характеру распространения хрупкий. После разрезки муфты на поверхности излома обнаружен шевронный узор (рис. 5,б–г), указывающий, что очаг разрушения находится в области третьей нитки со стороны монтажного резьбового соединения муфты с НКТ Ø73×5,5 мм. От этого очага трещина развивалась практически вдоль оси муфты в сечении, перпендикулярном действию максимальных окружных напряжений.

Согласно результатам спектрального анализа химического состава металла муфты химический состав металла разрушенной муфты соответствует стали типа 36Г2С.

Результаты испытания на растяжение вырезанных из металла разрушенной муфты образцов показали: предел прочности  $\sigma_b \approx 855$  МПа, предел текучести  $\sigma_t \approx 589$  МПа, относительное удлинение 17 %, что соответствует стали группы прочности Е по ГОСТ 633 [2].

Твердость металла муфты составляет 215–244 НВ, при этом максимальная твердость 244 НВ наблюдается в области очага излома муфты.

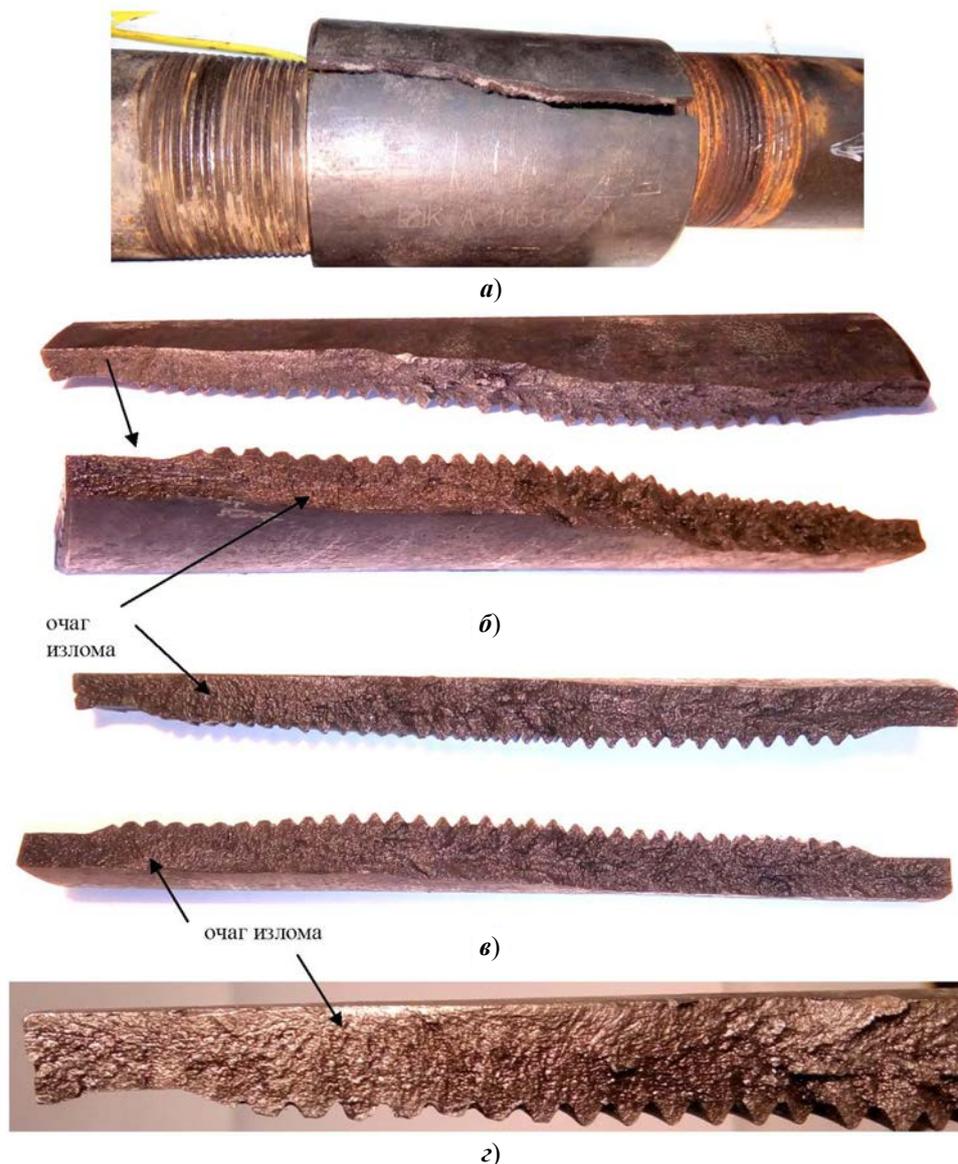


Рис. 5. Разрушенная муфта НКТ 73×5,5 мм (а) и вид излома муфты (б–д)

Согласно результатам испытания образцов, вырезанных из металла разрушенной муфты, на ударный изгиб при температуре 0 °С величина ударной вязкости  $KCV^\circ$  незначительна – 5 Дж/см<sup>2</sup>.

Низкая величина ударной вязкости металла разрушенной муфты свидетельствует о повышенной чувствительности материала муфт к хрупким разрушениям, особенно при наличии повышенных напряжений и концентраторов напряжений, таким концентратором напряжений является резьба.

Согласно представленным данным величина крутящего момента при навинчивании в заводских условиях муфт на НКТ Ø73×5,5 мм не превышает 2600 Нм. Однако согласно акту проверки гидравлического ключа и пневмоспайдера максимальное давление, установленное регулировочным клапа-

ном при свинчивании НКТ, составляет 43,0 атм. При данном максимальном давлении согласно графику зависимости момента свинчивания от давления нагнетания величина крутящего момента при навинчивании в монтажных условиях муфт на НКТ  $\text{Ø}73 \times 5,5$  мм может достигать значения 3500 Нм, что в 1,35 раза превышает максимальную величину крутящего момента при навинчивании в заводских условиях муфт на НКТ  $\text{Ø}73 \times 5,5$  мм.

Разрушенная муфта имеет среднюю величину раскрытия трещины  $\sim 6,6$  мм (рис. 5,а), что свидетельствует о наличии в металле муфты значительных остаточных монтажных напряжений.

Величину остаточных напряжений в металле разрушенной муфты определяли согласно ГОСТ Р 54918 [3] по формуле (2). С учетом результатов измерительного контроля разрушенной муфты ( $t_{cp} = 5,51$  мм;  $D_{bc} = 90,6$  мм;  $D_{ac} = 92,7$  мм) остаточные напряжения достигают величины 309,4 МПа и составляют 52,5 % от предела текучести материала.

Повышенные остаточные напряжения в металле разрушенной муфты возникли вследствие превышения в 1,35 раза максимальной величины крутящего момента при навинчивании в монтажных условиях муфты на НКТ  $\text{Ø}73 \times 5,5$  мм по сравнению с максимальной величиной крутящего момента при навинчивании в заводских условиях.

Остаточные монтажные напряжения в металле разрушенной муфты, достигающие 52,5 % от предела текучести материала муфты, совместно с напряжениями от рабочих нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации НКТ, привели к образованию микротрещин в области третьей нитки со стороны монтажного резьбового соединения муфты с НКТ  $\text{Ø}73 \times 5,5$  мм (рис. 6). Эти микротрещины – эффективные концентраторы напряжений – под действием окружных напряжений инициировали образование в металле муфты продольной трещины со сквозным разрушением.

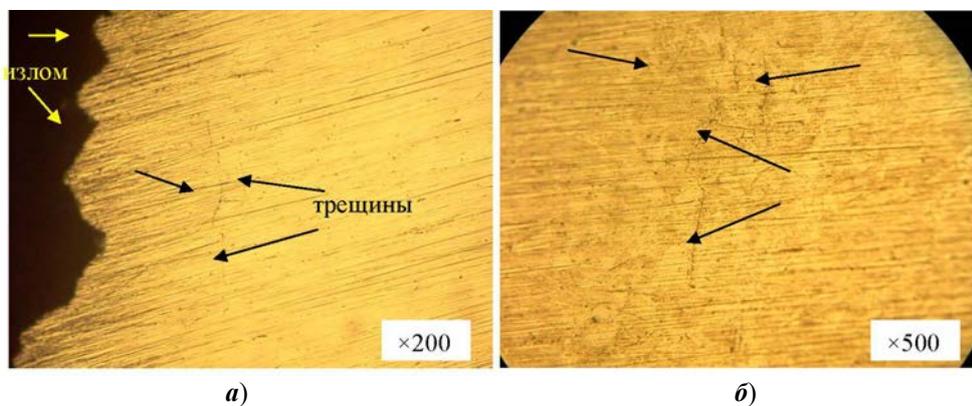


Рис. 6. Трещина и микротрещины в области излома и третьей нитки со стороны монтажного резьбового соединения муфты с НКТ  $\text{Ø}73 \times 5,5$  мм

Причиной разрушения муфты НКТ  $73 \times 5,5$  мм являются остаточные монтажные напряжения, вызванные превышением в 1,35 раза максимальной величины крутящего момента и достигающие 52,5 % от предела текучести материала муфты, которые совместно с напряжениями от рабочих нагрузок, возникающими в процессе эксплуатации НКТ, привели к образованию микро-

трещин с последующим преобразованием их в условиях сложного напряженного состояния в продольную трещину со сквозным разрушением муфты.

4. Разрушение муфты М-73×5,5 (рис. 7) произошло в процессе эксплуатации НКТ в сероводородсодержащей нефтегазовой скважине.

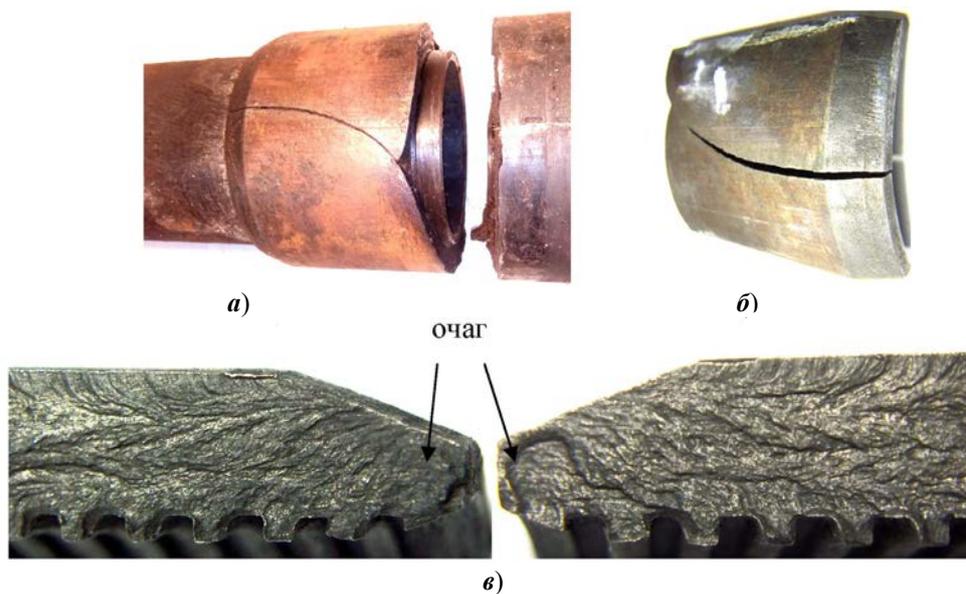


Рис. 7. Разрушение муфты М-73×5,5 и распространение трещины (а, б), излом муфты НКТ (в)

Магистральная трещина с раскрытием от  $\sim 0,6$  до  $\sim 0,9$  мм распространялась от торца муфты практически вдоль оси муфты на длине  $\sim 16$  мм, затем под углом  $\sim 20^\circ$  трещина достигала упорный уступ муфты, раздваивается, огибая по окружности упорный уступ муфты (рис. 7,а–в).

Характер излома в области магистральной трещины хрупкий, в области упорного уступа и участка долома муфты – квазихрупкий, что характерно для разрушения материала муфты, эксплуатируемой в условиях повышенных напряжений и воздействия сероводородсодержащих сред (рис. 7). Рельеф следов поверхности излома указывает на направление движения трещины от торца муфты, где в области впадины первого витка резьбы находится очаг излома (рис. 7,в). Толщина стенки муфты в районе очага излома по впадине резьбы составляет 4,4 мм. Утонение стенки муфты отсутствует.

Согласно результатам спектрального химического анализа состав металла муфты соответствует стали 30ХМА.

Твердость металла муфты находится в пределах 22–24 HRC, что не соответствует требованиям стандарта NACE MR0175 [4], в котором максимальное значение твердости принято 22 HRC для стальных изделий, эксплуатируемых в условиях воздействия сероводородсодержащих сред. При проведении металлографических исследований в области излома обнаружены микротрещины сероводородного растрескивания (рис. 8), свидетельствующие о наличии наводороживания и значительных остаточных технологических напряжений в металле муфты, обусловленных повышенной твердостью металла муфты.

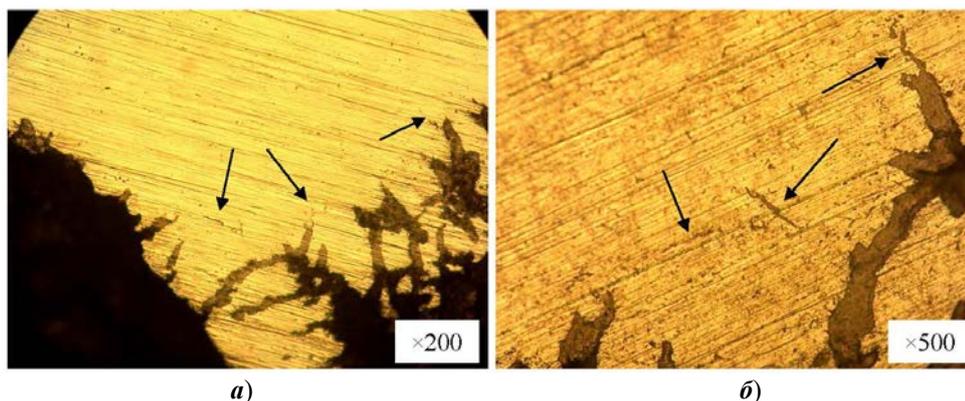


Рис. 8. Микротрещины в металле муфты М-73×5,5

Согласно результатам испытания образцов, вырезанных из резьбовой части муфты, на ударный изгиб при температуре плюс 20 °С ударная вязкость КСВ составляет 92–104 Дж/см<sup>2</sup>.

После разрезки разрушенной части муфты М-73×5,5 с НКТ установлено, что длина резьбовой части НКТ, свинченной с муфтой, составляет ~59 мм, тогда как расстояние от торца муфты до упорного уступа муфты составляет ~66 мм, что не соответствует требованиям ГОСТ 633 [2].

При создании герметичного соединения муфты с НКТ, имеющей укороченную резьбовую часть – меньше чем расстояние от торца муфты до упорного уступа, – в металле муфты возникают значительные монтажные окружные напряжения растяжения, суммирующиеся с окружными напряжениями растяжения, возникающими от рабочих давлений среды в НКТ. Кроме того, на данное резьбовое соединение муфты с трубой действуют осевые напряжения, возникающие от веса нижерасположенных НКТ. При этом в условиях двухосного напряженного состояния максимальная концентрация напряжений возникает в области впадины первого витка резьбы муфты, имеющей повышенную твердость, что при воздействии сероводородсодержащей рабочей среды приводит к зарождению микротрещин и хрупкому излому металла муфты.

Причиной разрушения муфты М-73×5,5 являются нерегламентированные повышенные монтажные напряжения, возникшие при свинчивании муфты с НКТ, имеющей укороченную резьбовую часть – меньше чем расстояние от торца муфты до упорного уступа, и вызвавшие, наряду с проектными нагрузками, в условиях двухосного напряженного состояния значительную концентрацию напряжений в области впадины первого витка резьбы муфты, имеющей повышенную твердость, что при воздействии сероводородсодержащей рабочей среды привело к зарождению микротрещин, объединившихся в макротрещину и сквозное разрушение металла муфты.

### Заключение

Основными причинами разрушения муфт НКТ являются:

– концентраторы напряжений – вмятины-риски на внешних поверхностях муфт, оставшиеся от воздействия плашек гидравлических ключей;

– нерегламентированные монтажные напряжения, возникшие при свинчивании муфт с НКТ крутящим моментом повышенной величины;  
 – микротрещины водородного растрескивания, возникающие при воздействии в условиях сложного напряженного состояния сероводородсодержащей рабочей среды на области металла муфт, содержащих концентраторы напряжений – вмятины-риски.

#### **Библиографический список**

1. **Кушнарченко, В. М.** Дефекты и повреждения деталей и конструкций / В. М. Кушнарченко, В. С. Репях, Е. Ю. Чирков, Е. В. Кушнарченко. – Оренбург : ОГУ – ООО «Руссервис», 2012. – 531 с.
2. ГОСТ 633–80. Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия. – Введ. 01.01.1983. – Взамен ГОСТ 633-63. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 107 с.
3. ГОСТ Р 54918–2012 (ISO/TR 10400:2007). Трубы обсадные, насосно-компрессорные, бурильные и трубы для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности. Формулы и расчет свойств. – Введ. 01.10.2013. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 252 с.
4. Нефтяная, нефтехимическая и газовая промышленность – Материалы для применения в средах, содержащих сероводород, при добыче нефти и газа. Часть 3. CRA (коррозионностойкие сплавы) и другие сплавы, стойкие к растрескиванию. – Введ. 01.09.1995. – Vernier, Geneva, Switzerland: ISO, 2015. – 91 с.

#### **References**

1. Kushnarenko V. M., Repyakh V. S., Chirkov E. Yu., Kushnarenko E. V. *Defekty i povrezhdeniya detaley i konstruksiy* [Defects and damage to parts and structures]. Orenburg: OGU. OOO «Russervis», 2012, 531 p. ISBN 978-5-904627-16-4. [In Russian]
2. GOST 633-80. *Truby nasosno-kompressornye i mufty k nim. Tekhnicheskie usloviya. Vved. 01.01.1983. Vzamen GOST 633-63* [Tubing pipes and couplings for them. Technical conditions. Introduction 01.01.1983. Instead of State Standart 633-63]. Moscow: Standartinform, 2010, 107 p. [In Russian]
3. GOST R 54918-2012 (ISO/TR 10400:2007). *Truby obsadnye, nasosno-kompressornye, buril'nye i truby dlya truboprovodov neftyanoy i gazovoy promyshlennosti. Formuly i raschet svoystv. Vved. 01.10.2013* [Casing pipes, pump-compressor-not, drill pipes and pipes for pipelines of the oil and gas industry. Formulas and calculation of properties. Introduction 01.10.2013]. Moscow: Standartinform, 2014, 252 p. [In Russian]
4. ANSI/NACE MR0175/ISO15156-3:2015. *Petroleum and natural gas industries — Materials for use in H2S-containing environments in oil and gas production — Part 3: Cracking-resistant CRAs (corrosion-resistant alloys) and other alloys. Mezhdunarodnyy standart ANSI/NACE MR0175/ISO15156-3:2015*. 91 p.

#### **Кушнарченко Владимир Михайлович**

доктор технических наук, профессор,  
 кафедра механики материалов,  
 конструкций и машин, Оренбургский  
 государственный университет  
 (Россия, г. Оренбург, пр. Победы, 13)

E-mail: vmkushnarenko@mail.ru

#### **Kushnarenko Vladimir Mikhaylovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
 sub-department of mechanics of materials,  
 structures and machines, Orenburg  
 State University (13 Pobedy avenue,  
 Orenburg, Russia)

***Репях Виталий Сергеевич***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра материаловедения и технологии  
материалов, Оренбургский  
государственный университет  
(Россия, г. Оренбург, пр. Победы, 13)

E-mail: podval2004@mail.ru

***Repyakh Vitaliy Sergeevich***

Candidate of engineering sciences,  
associate professor, sub-department  
of materials science and materials  
technology, Orenburg State University  
(13 Pobedy avenue, Orenburg, Russia)

***Тавтилов Ильфат Шайдуллович***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра материаловедения и технологии  
материалов, Оренбургский  
государственный университет  
(Россия, г. Оренбург, пр. Победы, 13)

E-mail: elfkent@mail.ru

***Tavtilov Il'fat Shaydullovich***

Candidate of engineering sciences,  
associate professor, sub-department  
of materials science and materials  
technology, Orenburg State University  
(13 Pobedy avenue, Orenburg, Russia)

***Решетов Сергей Юрьевич***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра механики материалов,  
конструкций и машин, Оренбургский  
государственный университет  
(Россия, г. Оренбург, пр. Победы, 13)

E-mail: suresh\_oren@mail.ru

***Reshetov Sergey Yur'evich***

Candidate of engineering sciences,  
associate professor, sub-department  
of mechanics of materials, structures  
and machines, Orenburg State University  
(13 Pobedy avenue, Orenburg, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Кушнаренко, В. М. Причины повреждений муфт насосно-компрессорных труб / В. М. Кушнаренко, В. С. Репях, И. Ш. Тавтилов, С. Ю. Решетов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 122–134. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-10.

УДК 621.963

DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-11

*А. Е. Зверовщиков, Г. Г. Лебедев, П. А. Гурин*

## ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* В качестве рабочего инструмента при гидроабразивной обработке используется вода с порошковым материалом. Качество обработки и ресурс оборудования зависит от характеристик поверхности и формы частиц абразивного материала, к которому предъявляется ряд существенных требований. Стоимость материалов достаточно велика. Целью работы являлось установление возможности повторного использования абразивного материала.

*Материалы и методы.* При проведении экспериментов в качестве основной рабочей среды применялся абразив GMA 80 MESH ТУ 3986-00176245879–2011 зернистостью основной фракции 0,8 мм. Обрабатываемая деталь – лист толщиной 20 мм из алюминиевого сплава Д16 ГОСТ17232-99. При компьютерном моделировании использовалась программа ПО АСКОН «Компас 3D».

*Результаты.* При гидроабразивной обработке значительно изменяются радиусы выступов зерен, которые являются основной характеристикой абразивной способности профиля. Это приводит к снижению их режущей способности и необходимости коррекции технологии гидроабразивной резки для обеспечения требуемого качества реза. Однако при разрушении зерен происходит формирование новых кромок с иными геометрическими характеристиками, что создает предпосылки для сохранения работоспособности зерен.

*Выводы.* Проанализированы изменения параметров абразивного зерна в порошке для гидроабразивной обработки после рабочего цикла для определения возможности его повторного применения. Изложены теоретические предпосылки к изменению характеристик поверхностей реза при повторном использовании зерна.

**Ключевые слова:** зерно, абразив, абразивные частицы, контур, радиус, гидроабразивная обработка.

*А. Е. Zverovshchikov, G. G. Lebedev, P. A. Gurin*

## THE RESEARCH OF CHANGES IN THE TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT STATE DURING HYDROABRASIVE TREATMENT

### **Abstract.**

*Background.* Water with a powder material is used as a working tool for hydroabrasive treatment. The quality of treatment and the service life of the equipment depends on the surface's characteristics and the shape of the abrasive material's parti-

---

© Зверовщиков А. Е., Лебедев Г. Г., Гурин П. А., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

cles, which is subject to a number of significant requirements. The cost of materials is quite high. The purpose of the work is to establish the possibility of reuse of abrasive material.

*Materials and methods.* The main machining medium in experiment was the abrasive GMA 80 MESH TR (technical requirements) 3986-00176245879–2011 with the grain size of the main fraction 0.8 mm. Work piece was 20 mm thick sheet of aluminum alloy D16 State Standart 17232-99. The computer simulation program “Kompas 3D” was used for ASCON.

*Results.* During hydroabrasive treatment, the radii of the grain protrusions, which are the main characteristic of the profile’s abrasive ability, significantly change. This leads to a reduction in their cutting capacity and the need to correct the hydroabrasive cutting technology to ensure the required cutting quality. However, when the grains are destroyed, new edges with different geometric characteristics are formed, which creates prerequisites for maintaining the grain’s performance.

*Conclusions.* Changes in the parameters of abrasive grains in powder for hydroabrasive treatment after a working cycle are analyzed to determine the possibility of its reuse. The theoretical prerequisites for the change in the characteristics of the cut surfaces when reusing grain are stated.

**Keywords:** grain, abrasive, abrasive particles, contour, radius, hydroabrasive treatment.

### **Введение**

Гидроабразивная обработка широко и эффективно применяется при разрезании и раскрое самых разнообразных конструкционных материалов.

Рабочим инструментом данной технологии является техническая вода, играющая роль носителя порошкового материала, который осуществляет процесс абразивного резания. Качество обработки и ресурс оборудования зависит от качества и характеристик абразивного материала, к которому предъявляется ряд существенных требований.

Абразивной составляющей рабочей среды наиболее часто служит зерно граната зернистостью 0,80 мм. Абразивное зерно имеет специфическую для режущего материала округлую форму, сочетая режущие способности и обеспечивая щадящий режим эксплуатации систем подачи абразивного материала в зону резания. Производятся подобные материалы рядом ведущих зарубежных фирм: JH Mining (Китай), GMA Garnet (Австралия), Blastrite (Индия / Юап).

В рамках импортозамещения отечественное предприятие ООО «Урал-грит» выпускает подобные абразивы для гидроабразивной резки [1]. Даже в условиях отечественного производства стоимость материалов достаточно велика и доходит до 65–70 % от всех технологических затрат.

Именно поэтому вопрос возможности повторного использования режущего материала является столь актуальным. Несмотря на то что на текущий момент известны различные установки и способы [2] для осуществления повторного использования абразива, нет количественных критериев оценки геометрии зерен порошкового материала для понимания применимости его в рассматриваемой технологии, а самое главное – изменений зерна в процессе резания, которые позволили бы определить их пригодность к вторичному использованию. Известны методики оценки размера зерна восстановленного абразива [3], но в них абразивная способность частиц, которая является функцией твердости и конфигурации режущего профиля, практически не учитывается.

### 1. Анализ состояния контура исходного зерна

При исследованиях в качестве исходной точки было выбрано состояние исходного зерна наиболее распространенного абразивного материала, применяемого для гидроабразивной обработки. Это обусловлено отсутствием в нормативной документации [4] соответствующих технических требований к профилю зерен, абразивной способности либо к каким-то иным технологическим характеристикам зерен абразивного порошка, обуславливающим эффективность резания в рассматриваемом процессе.

При проведении экспериментов по определению изменения состояния абразивных частиц материала при гидроабразивной резке в качестве основной рабочей среды применялся абразив GMA 80 MESH TU 3986-00176245879–2011 зернистостью основной фракции 0,8 мм. Генеральная совокупность параметров оценивалась по выборкам из 50 частиц из нескольких партий материала. Исследования контура проводились на оптическом микроскопе с 50-кратным увеличением.

Фотографии зерен импортировались в ПО АСКОН «Компас 3D» в масштабе, соответствующем известным размерам эталонного образца. Далее выполнена аппроксимация контура зерен массивом дуг различного радиуса. Статистический анализ показал, что контуры новых абразивных частиц (рис. 1) по совокупности участков могут с достаточной точностью быть аппроксимированы выпуклыми и вогнутыми дугами. Выполнена интервальная оценка параметров. Проверка однородности параметров интервальной оценки для выборок из различных партий показала отсутствие статистически значимых различий в геометрии профиля зерен порошка.

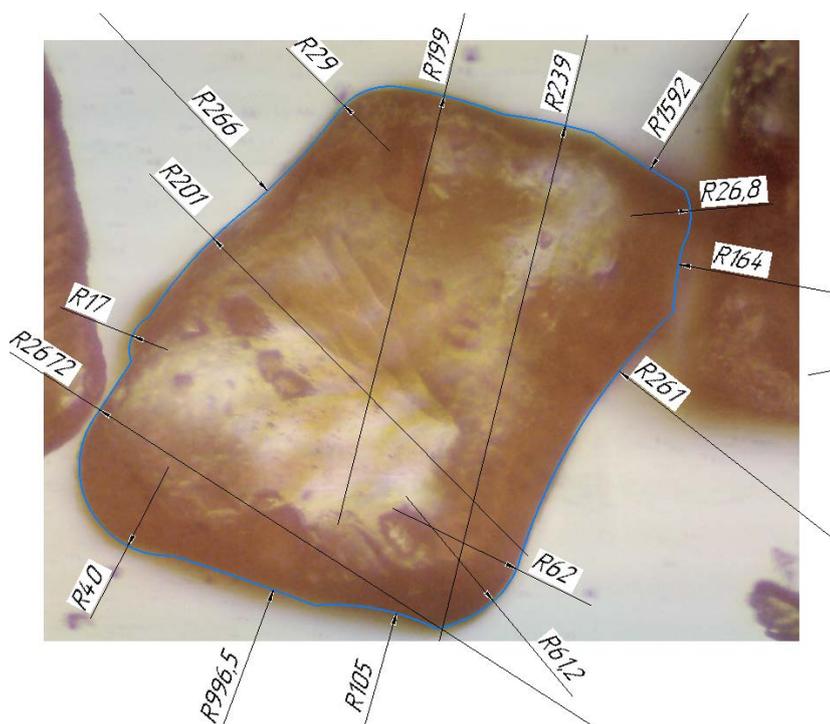


Рис. 1. Исходное зерно граната-альмандин (ТУ 3986-00176245879–2011) при построении контура

Средний радиус выступов на массиве выборок составляет  $R_{\text{вс}} = 0,089 \pm 0,02$  мм, при размахе радиусов  $W_{\text{вс}} = 0,6 \pm 0,05$  мм, дисперсия радиусов  $S_{\text{вс}}^2 = 0,08$  (рис. 2).

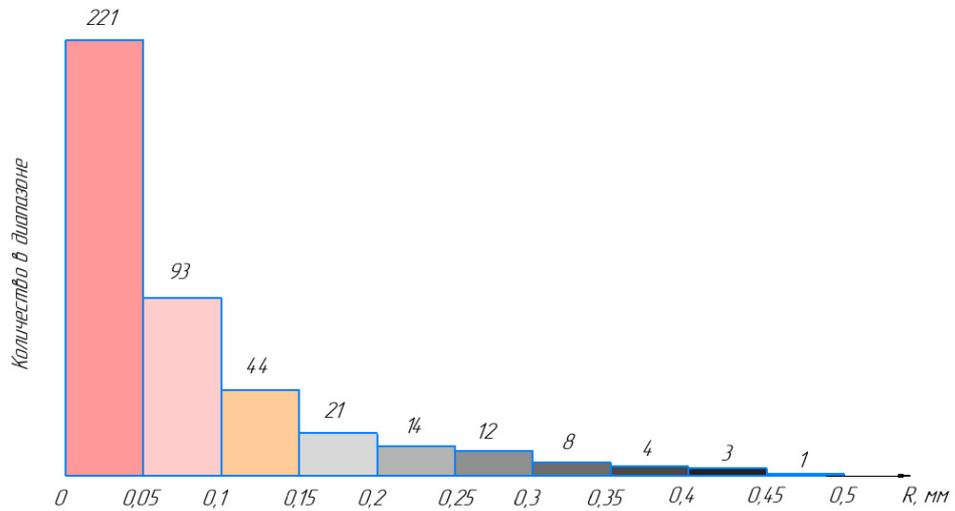


Рис. 2. Радиусы выступов контура частицы до обработки

Закон распределения радиусов выпуклых участков близок к нормальному.

Впадины имеют контур с дугами средним радиусом  $R_{\text{вп}} = 0,112$  мм, размахом радиусов  $W_{\text{вп}} = 0,49$  мм, дисперсией  $S_{\text{вп}}^2 = 0,014$  (рис. 3).

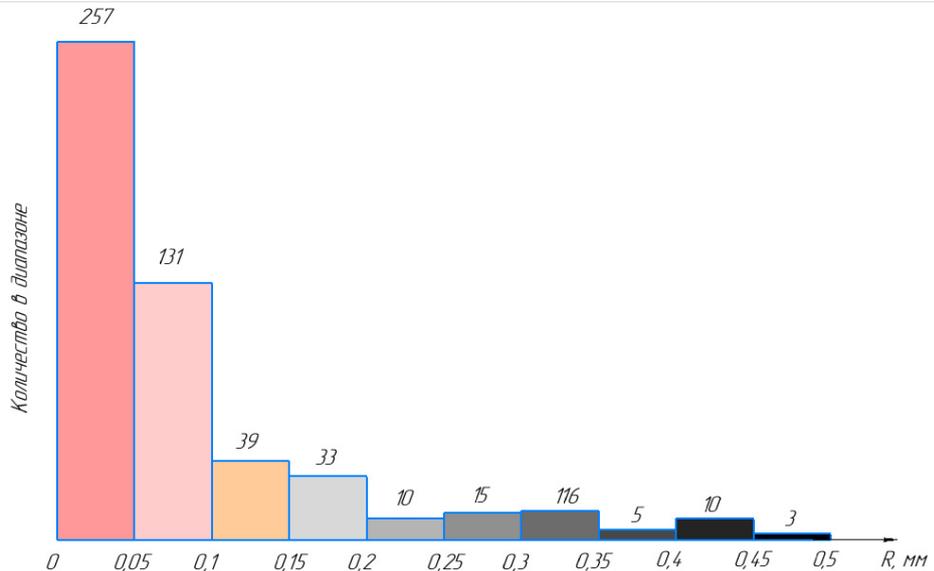


Рис. 3. Радиусы впадин участков контура частицы до обработки

## 2. Анализ контура и общего состояния использованного зерна

После исследования исходных характеристик абразива гранатовым зерном был обработан лист толщиной 20 мм из алюминиевого сплава Д16 ГОСТ17232–99 при скорости реза 280 мм/мин и расходе абразивного материала 450 г/мин (давление 6000 бар). После нескольких экспериментов состояние зерна оценивалось по аналогичным выборкам.

На фотографиях наряду с зернами основной фракции присутствуют частицы шлама разрушенных абразивных зерен и микростружка, образованная при резании (рис. 4). Микростружка имеет на фото темную окраску. Средние размеры микростружки составляют 18–35 мкм в поперечнике.

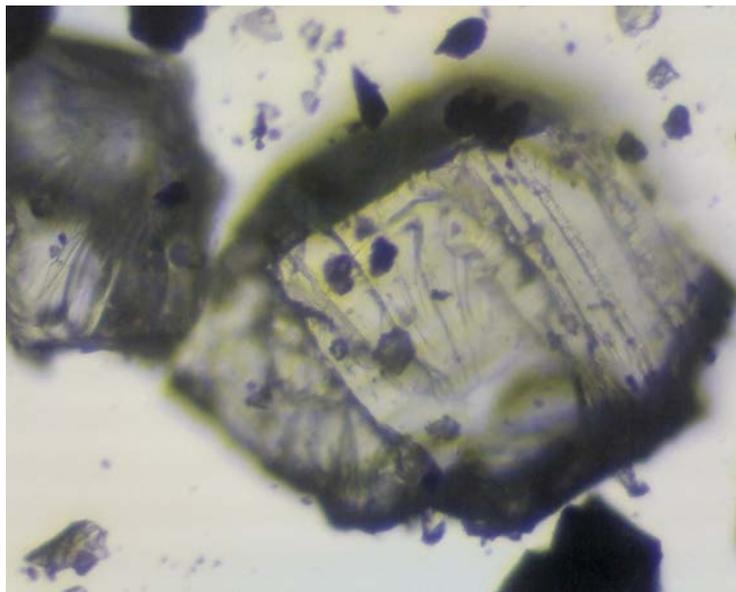


Рис. 4. Зерно использованного граната-альмандин и шлам (50-кратное увеличение)

Абразивный шлам имеет остроугольную форму частиц и средний размер в поперечнике 11,5 мкм.

Указанные размеры микростружки и абразивного шлама позволяют утверждать, что преимущественным процессом, определяющим производительность и качество поверхностей при гидроабразивной обработке, является микрорезание вершинами зерен. Следовательно, для описания процесса применимы расчетные и теоретические положения, разработанные для данного процесса.

Форма зерна использованного абразивного материала по визуальной оценке не претерпела принципиальных изменений. Однако на поверхностях имеют место выраженные хрупкие сколы. Конфигурация линии, характеризующей внешний контур, отличается от контура исходного зерна.

Для принятия решения о повторном использовании необходима количественная оценка произошедших изменений контура и размеров зерен.

В результате получены следующие распределения (рис. 5).

Среднее значение радиуса выступов составило  $R_{BC} = 0,121$  мм, впадин  $R_{ВП} = 116$  нм, соответственно размах и дисперсия упомянутых показателей

составили 0,561 и 0,014 мм<sup>2</sup> для выступов, 0,581 и 0,018 мм<sup>2</sup> – для впадин (табл. 1).

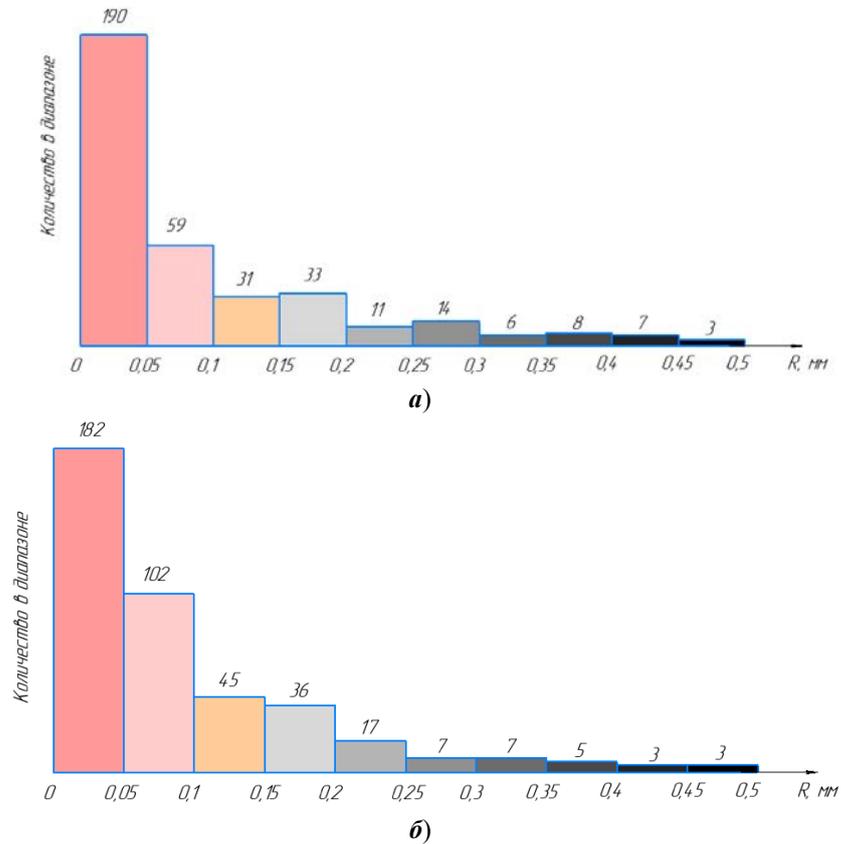


Рис. 5. Распределение размеров контура: **а** – радиусы выступов абразивного зерна; **б** – радиусы впадин абразивного зерна

Таблица 1

Характеристики контура абразивного зерна

	Выпуклые			Вогнутые		
	$R_{вс}$ , мм	$W_{вс}$ , мм	$S_{вс}^2$	$R_{вс}$ , мм	$W_{вс}$ , мм	$S_{вс}^2$
Новое зерно	0,093	0,551	0,011	0,104	0,582	0,014
Зерно после 1 цикла обработки	0,121	0,561	0,014	0,116	0,581	0,018

Проверка однородности дисперсий выпуклых участков по критерию Фишера при уровне значимости 0,05 выявила статистическую однородность дисперсий, что свидетельствует об отсутствии неучтенных факторов.

Проверка однородности средних значений выступов и впадин по критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05 доказала, что расхождение между средними значениями до и после обработки значимо. В то же время статистического различия внутри выборок новых и использованных зерен для

рассматриваемых параметров не выявлено. Таким образом, изменения контура профиля зерна после цикла однократной обработки являются существенными.

Данные изменения контура профиля меняют технологические характеристики зерна гранатового порошка.

Во-первых, усилие, необходимое для внедрения вершины зерна в поверхность заготовки и достаточное для перехода от упругой деформации к пластической и далее к процессу резания вырастет пропорционально радиусу выступа частицы [5]. Это приведет к необходимости повышения кинетической энергии частицы в момент взаимодействия с поверхностью. По приближительным подсчетам, увеличение скорости гидроабразивной струи для сохранения прежней производительности, достигаемой на новом зерне, должно составить 5–7 % от исходной. Либо для формирования одинаковой шероховатости должна быть уменьшена скорость подачи, определяющая формирование поверхности реза. Уменьшение скорости реза пропорционально уменьшению количества частиц с радиусом выступов, достаточным для абразивного резания при давлениях, обеспечивающих внедрение частиц в поверхность заготовки. Расчет такого количества зависит от твердости и прочности материала заготовки и весьма трудоемок, поэтому компенсацию производительности проще выполнить за счет увеличения скорости гидроабразивной струи.

Также увеличение радиусов выступов позволяет предположить, что доля частиц, производящих при исходной динамике контакта с поверхностью пластическое, а не диспергирующее воздействие, вырастет. Это в свою очередь при склонности материала заготовки к упрочнению приведет к росту твердости поверхностей реза и формированию сжимающих остаточных напряжений.

### Заключение

Таким образом, при обработке значительно изменяются радиусы выступов зерен, которые являются основной характеристикой абразивной способности профиля. Это неизбежно приведет к снижению их режущей способности и необходимости коррекции технологии гидроабразивной резки для обеспечения исходно запланированного качества реза. Однако разрушения зерен говорят о формировании новых кромок с иными геометрическими характеристиками, что создает предпосылки для сохранения работоспособности зерен. Оценка состояния режущего профиля единичного абразивного зерна позволяет оценить возможность его многократного рециклинга для гидроабразивной обработки.

### Библиографический список

1. UralGRIT : официальный сайт. – URL: [http://www.uralgrit.com/abrazivnie-poroshki/stat\\_i/sravnitelnye-ispytaniya-gidroabraziva-80-mesh-uralgrit-i-granatovogo-peska-garnet/](http://www.uralgrit.com/abrazivnie-poroshki/stat_i/sravnitelnye-ispytaniya-gidroabraziva-80-mesh-uralgrit-i-granatovogo-peska-garnet/)
2. Способ рециклинга отходов гранатового песка от гидроабразивной резки / Ю. М. Федорчук, В. В. Матвиенко, А. С. Ивашутенко и др. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2701017C1\\_20190924.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2701017C1_20190924.pdf).
3. **Яшков, В. А.** Моделирование взаимодействия режущих абразивных зерен с поверхностью детали / В. А. Яшков // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 12-2. – С. 403–407.
4. Технические условия ТУ 3988-002-76245879–2011. Гранатовый порошок. – Москва : ЗАО «Р-Гарнет», 2011. – 16 с.

5. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Х. Добычин, В. С. Комбалов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 526 с.

### **References**

1. *UralGRIT*: official site. Available at: [http://www.uralgrit.com/abrazivnie-poroshki/stat\\_i/sravnitelnye-ispytaniya-gidroabraziva-80-mesh-uralgrit-i-granatovogo-peska-garnet/](http://www.uralgrit.com/abrazivnie-poroshki/stat_i/sravnitelnye-ispytaniya-gidroabraziva-80-mesh-uralgrit-i-granatovogo-peska-garnet/) [In Russian]
2. Fedorchuk Yu. M., Matvienko V. V., Ivashutenko A. S. et al. *Sposob retsiklinga ot-khodov granatovogo peska ot gidroabrazivnoy rezki* [Method for recycling garnet sand waste from hydroabrasive cutting]. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2701017C1\\_20190924.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2701017C1_20190924.pdf). [In Russian]
3. Yashkov V. A. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies]. 2018, no. 12-2, pp. 403–407. [In Russian]
4. *Tekhnicheskie usloviya TU 3988-002-76245879–2011. Granatovyy poroshok* [Technical requirements TR 3988-002-76245879-2011]. Moscow: ZAO «R-Garnet», 2011, 16 p. [In Russian]
5. Kragel'skiy I. V., Dobychin M. Kh., Kombalov V. S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Fundamentals of friction and wear calculations]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p. [In Russian]

---

#### ***Zverovshchikov Aleksandr Evgen'evich***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра технологий и оборудования  
машиностроения, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [azwer@mail.ru](mailto:azwer@mail.ru)

#### ***Zverovshchikov Aleksandr Evgen'evich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of engineering technologies  
and equipment, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### ***Lebedev Gennadiy Gennad'evich***

аспирант, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [normatechnology@gmail.com](mailto:normatechnology@gmail.com)

#### ***Lebedev Gennadiy Gennad'evich***

Postgraduate student, Penza  
State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

#### ***Gurin Pavel Aleksandrovich***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра технологий и оборудования  
машиностроения, Пензенский  
государственный университет,  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [sbgurin\\_pavel@list.ru](mailto:sbgurin_pavel@list.ru)

#### ***Gurin Pavel Aleksandrovich***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of engineering  
technologies and equipment, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

---

#### **Образец цитирования:**

Зверовщиков, А. Е. Исследования изменения состояния технологической среды при гидроабразивной обработке / А. Е. Зверовщиков, Г. Г. Лебедев, П. А. Гурин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 135–142. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-11.

## **Вниманию авторов!**

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

**Обращаем внимание авторов** на то, что в соответствии с этическим кодексом журнала для обеспечения единообразия перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык (в сведениях об авторах и списке литературы) осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисовочными подписями.

**Формулы** в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

**Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.**

### **Уважаемые читатели!**

Для гарантированного и своевременного получения журнала «**Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки**» рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год. Научные специальности журнала:  
05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки  
05.02.08 Технология машиностроения  
05.02.11 Методы контроля и диагностика в машиностроении  
05.11.01 Приборы и методы измерения (по видам измерений)  
05.11.14 Технология приборостроения  
05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)  
05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)  
05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. (841-2) 64-32-89. E-mail: [VolgaVuz@mail.ru](mailto:VolgaVuz@mail.ru)

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

---

### **ЗАЯВКА**

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20\_\_ г.

№ 1 – \_\_\_\_\_ шт., № 2 – \_\_\_\_\_ шт., № 3 – \_\_\_\_\_ шт., № 4 – \_\_\_\_\_ шт.

Наименование организации (полное) \_\_\_\_\_

ИНН \_\_\_\_\_ КПП \_\_\_\_\_

Почтовый индекс \_\_\_\_\_

Республика, край, область \_\_\_\_\_

Город (населенный пункт) \_\_\_\_\_

Улица \_\_\_\_\_ Дом \_\_\_\_\_

Корпус \_\_\_\_\_ Офис \_\_\_\_\_

ФИО ответственного \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Тел. \_\_\_\_\_ Факс \_\_\_\_\_ E-mail \_\_\_\_\_

Руководитель предприятия \_\_\_\_\_

(подпись)

(ФИО)

Дата «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.