

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 4 (52)

2019

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Астафьев А. Н., Геращенко С. И., Юрков Н. К.*  
Диагностическая система поддержки принятия решения  
для анализа серологических маркеров гепатита ..... 4
- Песошин В. А., Кузнецов В. М., Кузнецова А. С.* Генераторы  
псевдослучайных последовательностей не максимальной длины  
на регистрах сдвига с линейной обратной связью на основе  
примитивного многочлена в степени ..... 14
- Волчихин В. И., Зинкин С. А., Карамышева Н. С.* Организация  
функционирования облачно-сетевых распределенных  
вычислительных систем с архитектурой «агенты как сервисы» ..... 27

### ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

- Ишков А. С., Лемаев Р. А., Солодимова Г. А.* Повышение  
технико-экономической эффективности средств контроля параметров  
изоляции композиционных материалов для IGBT-модулей ..... 51
- Куроедов С. К., Светлов А. В., Смогунов В. В., Чураков П. П.*  
Диагностические модели электрических цепей  
с сосредоточенными параметрами ..... 63
- Боряк С. В.* Система управления перемещением мобильного робота  
в закрытых помещениях на основе данных ультразвуковой системы ..... 77
- Мясникова Н. В., Боряк С. В., Мясникова М. Г.* Обработка сигналов  
в системах ультразвуковой локации объектов для закрытых помещений ..... 87

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Кравчук А. С., Кравчук А. И.* Уточненная теория определения  
параметров пластического течения материала при сжатии  
по измеренной твердости по Мейеру ..... 98

<b>Курносое Н. Е., Захаров Ю. А., Николотов А. А.</b> Повышение качества поверхностного слоя при обработке восстановленных деталей транспортных машин.....	112
<b>Симонов Н. П.</b> Использование кавитационной технологии с наномодифицированной смазочно-охлаждающей жидкостью для повышения прочности поверхностного слоя в процессе финишной обработки конструкционных материалов .....	121

**UNIVERSITY PROCEEDINGS  
VOLGA REGION  
ENGINEERING SCIENCES**

№ 4 (52)

2019

**CONTENT**

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER  
ENGINEERING AND CONTROL**

- Astaf'ev A. N., Gerashchenko S. I., N. K. Yurkov* A diagnostic system of decision-making support for the analysis of serological markers of hepatitis ..... 4
- Pesoshin V. A., Kuznetsov V. M., Kuznetsova A. S.* Pseudo-random sequence generators of non-maximum length on shift registers with linear feedback based on a primitive polynomial of some power ..... 14
- Volchikhin V. I., Zinkin S. A., Karamysheva N. S.* Functioning organization of the cloud-network distributed computer systems with the architecture “agents as the services” ..... 28

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT  
AND RADIO ENGINEERING**

- Ishkov A. S., Lemaev R. A., Solodimova G. A.* Improving the technical and economic efficiency of means of control of isolation parameters of compositional materials for IGBT-modules ..... 52
- Kuroedov S. K., Svetlov A. V., Smogunov V. V., Churakov P. P.* Diagnostic models of lumped electric circuits ..... 63
- Boryak S. V.* A mobile robot movement control system in enclosed space based on the ultrasonic system data ..... 77
- Myasnikova N. V., Boryak S. V., Myasnikova M. G.* Signal processing in ultrasonic object's coordinate tracking systems for enclosed spaces ..... 87

**MACHINE SCIENCE AND BUILDING**

- Kravchuk A. S., Kravchuk A. I.* An improved theory of determining the parameters of plastic flow of material under compression by measured Meyer hardness ..... 99
- Kurnosov N. E., Zakharov Yu. A., Nikolotov A. A.* Improving the quality of the surface layer for the machining of restored parts of transport machines ..... 113
- Simonov N. P.* Applying the cavitation technology with nanomodified lubricant-cooling liquid to increase the strength of the surface layer when finishing constructional materials ..... 122

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

УДК 004.891.3

DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-1

*А. Н. Астафьев, С. И. Геращенко, Н. К. Юрков*

## ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СЕРОЛОГИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ ГЕПАТИТА

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования является методика диагностики нозологической формы гепатита с применением нейронных сетей. Диагностика нозологической формы предлагается с помощью использования системы поддержки принятия решения, реализующей нейросетевое моделирование. Система поддержки принятия решения позволяет решать сложные задачи, в которых требуется опыт специалиста, анализирующего точную оценку различных альтернативных диагнозов и предсказательный функционал.

*Материалы и методы.* Применены нейронной сети каскадной корреляции с настраиваемой топологией для системы поддержки принятия решения, где входными данными являются серологические маркеры, а выходными – нозологическая форма гепатита.

*Результаты.* Разработана система поддержки принятия решения, которая способна на основе значений серологических маркеров производить диагностику нозологической формы гепатита.

*Выводы.* Система поддержки принятия решения является подходящим методом для принятия клинических решений, так как изначально включает обработку частичных доказательств и неопределенности в отношении последствий прогнозируемых вмешательств.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решения, нозология гепатита, серологические маркеры, нейронная сеть каскадной корреляции.

*А. Н. Астафьев, С. И. Геращенко, Н. К. Юрков*

## A DIAGNOSTIC SYSTEM OF DECISION-MAKING SUPPORT FOR THE ANALYSIS OF SEROLOGICAL MARKERS OF HEPATITIS

---

© Астафьев А. Н., Геращенко С. И., Юрков Н. К., 2019. 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 object of the study is a method of diagnosis of nosological forms of hepatitis using neural networks. The method of diagnosis is offered through the use of a decision support system. The decision support system allows you to solve complex decision-making tasks that require specialists' experience, analyzing the accurate assessment of various alternative diagnoses, allowing you to analyze the predictive functionality.

*Materials and methods.* The authors applied a cascade correlation neural network with insisted topology for decision support system where the input data were serological markers and the output data were nosological forms of hepatitis.

*Results.* The researchers have developed the decision support system capable of diagnosing nosological forms of hepatitis based on the values of serological markers.

*Conclusions.* Decision support systems are an appropriate method for clinical decision-making, as they involve the processing of partial evidence and uncertainty about the effects of predicted interventions.

**Keywords:** decision support system, hepatitis nosology, serological markers, cascade correlation neural network.

**Введение**

Медицинская диагностика рассматривается как искусство, поскольку для определения точного диагноза требуется определенный опыт работы специалиста. Именно поэтому возникает необходимость в аппроксимации знаний специалиста. Аппроксимация знаний возможна с применением систем поддержки принятия решения, основанных на нейронных сетях [1] или других методах [2], моделирующих интеллектуальные возможности человека. В данном исследовании предлагается использование системы поддержки принятия решения для определения нозологической формы гепатита при использовании серологических маркеров.

Система поддержки принятия решения позволяет решать сложные задачи, в которых требуется опыт специалиста, анализирующего точную оценку различных альтернативных диагнозов и предсказательный функционал. Обобщенная структура системы поддержки принятия решений представлена на рис. 1.

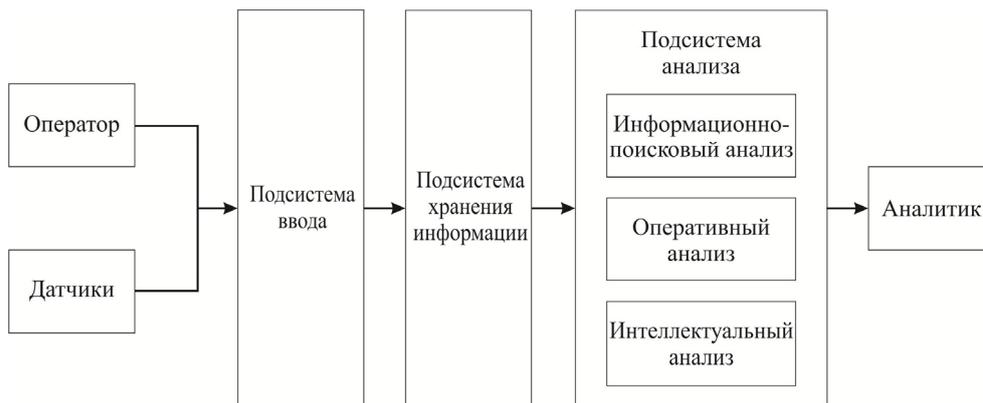


Рис. 1. Структура системы поддержки принятия решения

Система поддержки принятия решения реализуется с использованием языка программирования высокого уровня, который моделирует математический алгоритм нейронной сети, базу данных для хранения медицинских значений и интерфейс взаимодействия с пользователем. В процессе настройки системы происходит обучение на выборке с целью формирования общих зависимостей, на финальном этапе производится оценка эффективности системы на тестовой выборке.

Решение задачи определения нозологической формы возможно только на основе использования интеллектуальных алгоритмов, таких как нейронные сети, которые показывают значительную эффективность при решении сложных задачи.

## **1. Материалы и методы**

Многие исследования [3] доказали, что медицинские задачи, которые зачастую невозможно решить обычными математическими алгоритмами, решаются математическими методами, которые производят настройку решения в результате выявления скрытых зависимостей. К таким методам относятся нейронные сети.

Основной проблемой [4] нейронных сетей для решения задачи является подбор топологии, в качестве решения предлагается применение настраиваемой топологии. Нейронные сети с направленной активацией содержат несколько слоев нейронов в скрытом слое, увеличение числа которых происходит по мере обучения с «учителем». Обученная нейронная сеть сохраняет необходимое количество нейронов для решения поставленной задачи. Данный подход позволяет уменьшить ошибку на выходе и сберечь ресурсы вычислительной машины. Объединение нейронов в полученной сети имеет вид каскада (рис. 2). Все последующие слои подключаются к предыдущим, на выход сети подаются сигналы как крайних добавленных слоев, так и входные сигналы [5].

Данный подход включает в себе очевидные достоинства, по сравнению с обычными нейронными сетями:

- 1) архитектура формируется исходя из задачи исследования;
- 2) высокая скорость обучения обусловлена уменьшением числа элементов в сети и применением прямонаправленной топологии.

Скрытые слои и веса в сети формируются в процессе обучения и далее они не изменяются. Добавление нейронных слоев может происходить в процессе переобучения, когда пытаются максимизировать корреляцию между нейроном-кандидатом и ошибкой выходного слоя.

Для обучения сети в стандартном режиме применяется алгоритм прямого распространения ошибки:

- Первоначальная архитектура содержит в себе только входной и выходной слои; архитектура характерна для сетей с прямым распространением ошибки.

- В процессе обучения ошибка выхода минимизируется. Входной вектор  $X = [x_0, x_1, \dots, x_N]$  содержит компоненту  $x_0 = 1$ , которая формирует первоначальный сигнал:

$$y_j = \sum_{i=1}^N w_{ji} x_i, \quad (1)$$

где  $y_{ji}$  – выходной сигнал  $j$ -го нейрона;  $w_{ji}$  – вес связи между  $j$ -м нейроном и  $i$ -й компонентой входного вектора.

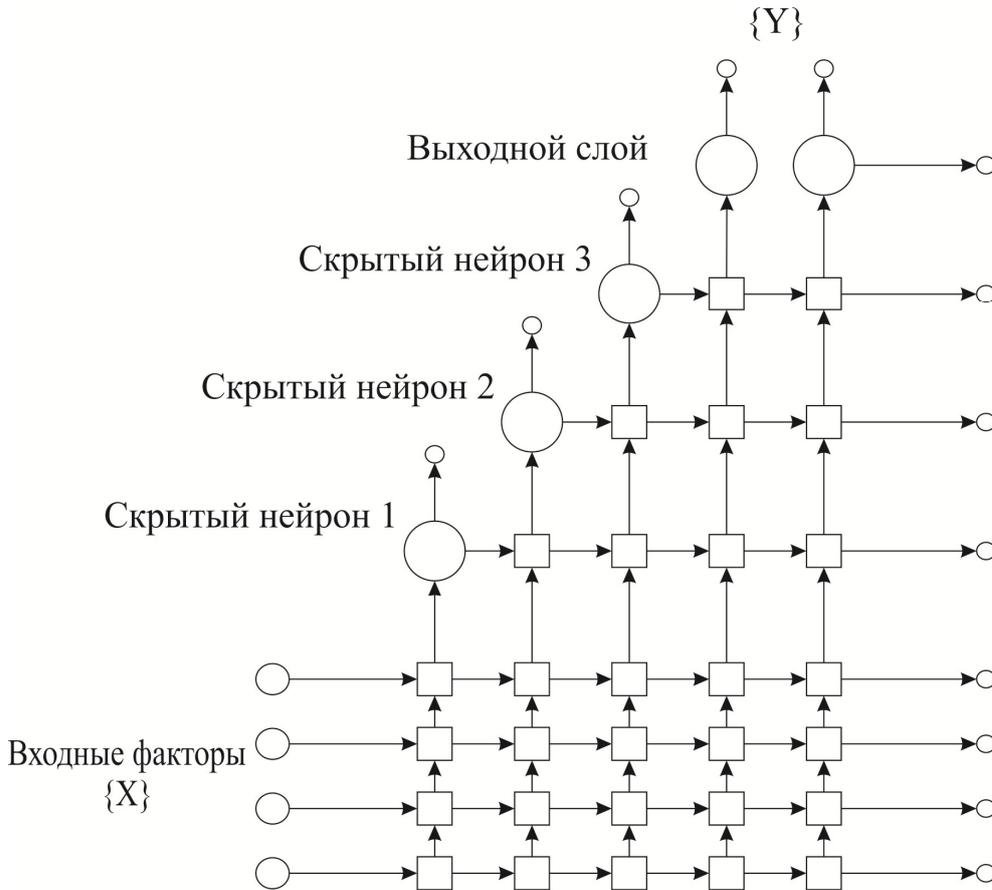


Рис. 2. Архитектура сети с направленной активацией нейронных элементов

Вычисление весовых коэффициентов исходя из минимизации ошибки выходного нейрона  $\Delta y_j$  имеет вид

$$\Delta y_j = y_j - d_j, \quad (2)$$

где  $d_j$  – желаемый сигнал обучения.

При превышении величины погрешности  $\Delta y_j$  выполняется корректировка весовых коэффициентов  $j$ -го нейрона по формуле

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \Delta w_{ji}(t), \quad (3)$$

где  $t$  – номер предыдущего цикла;  $(t+1)$  – номер текущего цикла;  $\Delta w_{ji}(t)$  – коррекция весового коэффициента,

$$\Delta w_{ji} = k \cdot x_i \cdot \Delta y_j, \quad (4)$$

здесь  $k$  – коэффициент, учитывающий динамику корректировки весов.

Обучение осуществляется до тех пор, пока минимизация суммы квадратов ошибок  $\Delta Y$  не перестает уменьшаться, данный параметр вычисляется по формуле

$$\Delta Y = \sum_{k=1}^P \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M (e_j)^2, \quad (5)$$

где  $e_j = \Delta y_j$ ;  $P$  – размерность выборки обучения;  $M$  – количество нейронов выходного слоя.

3. В случае, когда  $\Delta Y$  заикливается, не превышая порог обучения, происходит добавление дополнительных нейронов в сеть. Весовые коэффициенты добавленных нейронов носят случайный характер [5].

## **2. Система поддержки принятия решения**

Система поддержки принятия решения предназначена для помощи в принятии решения при диагностике гепатитов по серологическим маркерам. Существует несколько методик выявления вируса гепатита, и все большее развитие в этом направлении получает диагностика по серологическим маркерам [6], для чего используют реакции иммунофлюоресценции и иммуноферментный анализ. При иммуноферментном анализе с помощью тест-систем выявляется наличие антител в сыворотке крови человека. Учет результатов производят спектрофотометрически при двух значениях длин волн 450 и 620–680 нм по оптической плотности проб. В зависимости от комбинации проб – серологических маркеров и значений их плотности – определяется диагноз. Число возможных комбинаций достаточно большое, что затрудняет определение диагноза. Частота ошибок на догоспитальном этапе в диагностике гепатита А достигает 18 %, гепатита В – 27 % [7]. Если серологических маркеров 19 с 7 уровнями градаций, то количество возможных комбинаций показателей составит  $7^{19}$ . Учесть такое количество комбинаций практически невозможно. В зависимости от каждой комбинации показателей серологических маркеров определяется тот или иной диагноз. Наряду с необходимостью диагностирования вида гепатита А, В, С, D, E, F, G, формы их проявления – острой или хронической, требуется определять этиологию острых и хронических гепатитов, а также период болезни. Такая постановка задачи включает 40 возможных решений. Даже опытному врачу поставить правильный диагноз весьма затруднительно. Врач вынужден использовать не только свой опыт, но и интуицию.

Структура системы поддержки принятия решения состоит из базы данных, базы решений, базы навыков и двух вычислительных блоков, структурная схема представлена на рис. 3.

Система состоит из основных блоков:

- блок навыков – центральный блок системы, отвечающий за постановку диагноза;
- блок трансляции – блок, позволяющий импортировать данные из программного обеспечения фотометра в систему поддержки принятия решения;
- база данных – блок, содержащий сведения об обученных картах пациентов;

- блок вычислительный – содержит требуемые кодовые сигналы диагнозов, необходимые для обучения системы;
- блок обучения – используется для обучения системы;
- блок формирования отклика – используется для определения диагноза по введенным данным серологических маркеров.

Каждый блок обладает интерфейсом ввода/вывода и набором собственных функций. Основным элементом системы является блок навыков. Блок навыков формируется системой автоматически в процессе обучения по алгоритму нейронной сети.



Рис. 3. Структурная схема системы поддержки принятия решения

Обучающая выборка состоит из 341 практического примера. Заданная точность обучения составляет 0,1 %. В режиме диагностики заданная точность распознавания диагноза также составляет 0,1 %. В качестве исходной информации использованы данные иммуноферментного анализа – 25 серологических маркеров. Каждый маркер имеет 7 уровней градаций: 0 – нет данных, 1 – проба положительна, 2 – проба отрицательна, 3 – чаще положительна, 4 – чаще отрицательна, 5 – чаще с нарастанием, 6 – чаще с уменьшением. Погрешности обучения, равной 0,1 %, оказывается достаточно для безошибочного определения диагнозов, которым обучали.

Система способна посредством выработки весовых коэффициентов в процессе обучения производить прогнозирование любых данных, т.е. давать

предварительные советы в ситуациях, которым не обучали. Опыт и знания врачей при обучении преобразуются в технический опыт и интуицию, с помощью которых выявляется степень влияния каждого серологического маркера на принятие решения. Окно системы представлено на рис. 4.

Менее опытные врачи, пользуясь системой, могут получить квалифицированный совет. Опытным врачам эта система может помочь производить исследования в этой области и выявлять наиболее важные факторы по графику значений весовых коэффициентов серологических маркеров.

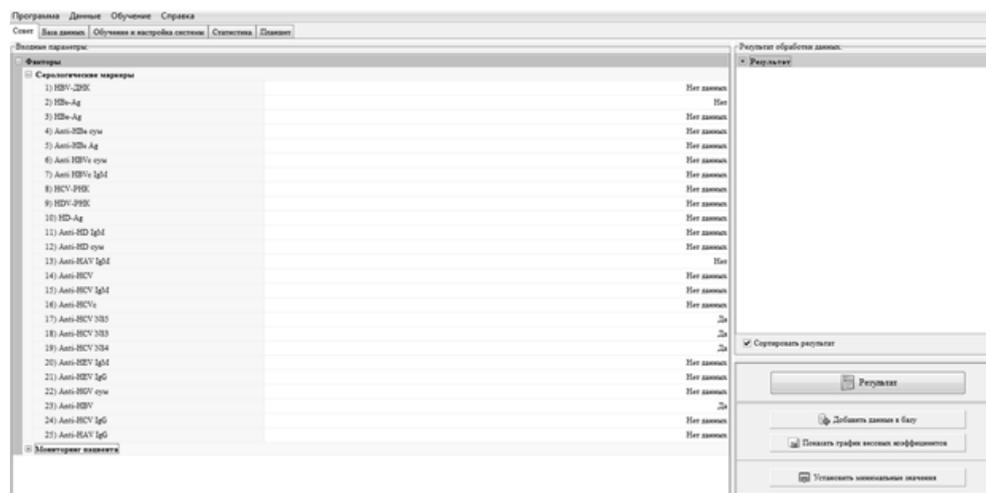


Рис. 4. Окно ввода данных

### 3. Результаты

База знаний была составлена по данным клинической инфекционной больницы и представляет собой карты больных, проходящих и закончивших свое лечение. На основе этих данных система после запуска автоматически обучается и формирует в результате базу навыков. Обучение производится на основе дифференцированного и интегрированного контуров управления, устанавливающих связь между множеством значений параметров входных факторов и множеством значений решений путем расчета весовых коэффициентов.

По результатам обучения были проведены следующие исследования:

– степень ошибки в зависимости от метода обучения. Оптимальным был выбран метод обучения по максимальным ошибкам системы. В результате исследования и обучения системы ошибка прогнозирования составляет 18 % в диагностике гепатита А и 27 % – гепатита В;

– степень ошибки в зависимости от количества циклов обучения. На построенном графике четко видно уменьшение ошибки прогнозирования с увеличением циклов обучения, критическим является значение 50, с увеличением которого ошибка стремится к минимальному значению (рис. 5);

– степень ошибки в зависимости от количества значений, включенных в обучающую выборку. Обучающая выборка составляла изначально 110, по мере увеличения ее до 173 наиболее точным методом является стратегия уменьшения ошибки прогнозирования до минимального значения (рис. 6).

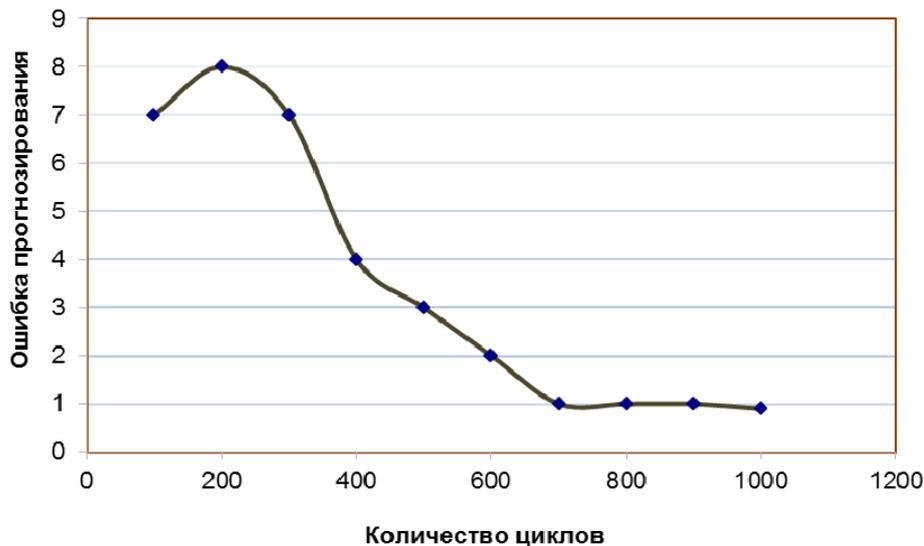


Рис. 5. Процесс обучения

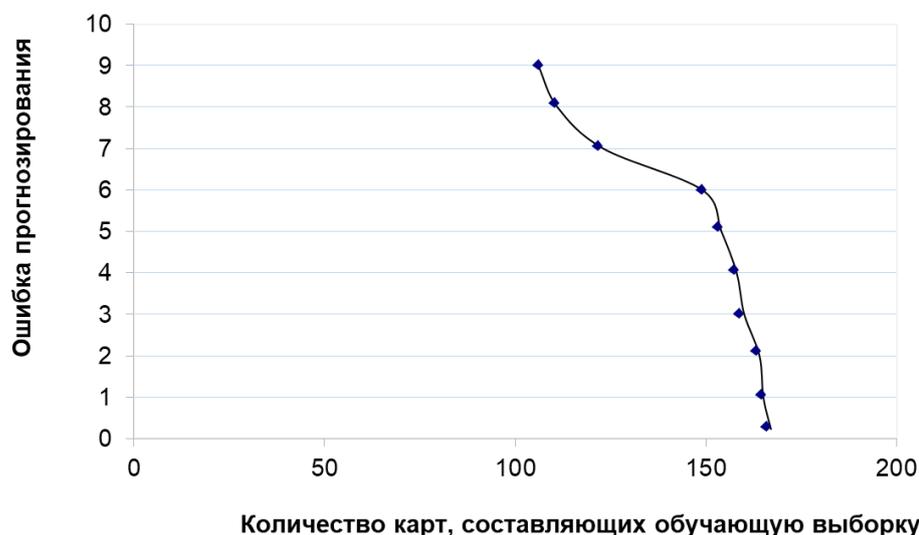


Рис. 6. Зависимость ошибки прогнозирования от обучающей выборки

Обучение проводилось по критическим значениям. Каждый раз в выборку включались примеры с наибольшим отклонением от фактического значения. При невключенных в выборку 178 примеров из 341 погрешность обучения составила 18 % в диагностике гепатита А и 27 % – гепатита В. Исходя из этих данных, можно сделать вывод, что обучение по критическим точкам является самым оптимальным для того, чтобы программа правильно функционировала.

### Заключение

Разработанные математические модели и программные средства могут использоваться медицинскими организациями, осуществляющими оказание

медицинской помощи. Система поддержки принятия решения является подходящим методом для принятия клинических решений, так как изначально включает обработку частичных доказательств и неопределенности в отношении последствий прогнозируемых вмешательств. В рамках предлагаемого исследования разрабатывалась система поддержки принятия решения для диагностики нозологической формы гепатита на основе данных серологических маркеров с помощью нейронной самоорганизующейся сети, известной как нейронная сеть каскадной корреляции. Экспериментальные результаты показали, что нейронные сети хорошо работают в диагностике нозологической формы гепатита на основе серологических маркеров.

#### **Библиографический список**

1. **Герашенко, С. М.** Джоульметрический декомпозиционный метод контроля состояний биологических объектов и его реализация / С. М. Герашенко, А. А. Митин, С. И. Герашенко // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.* – 2009. – № 4 (12). – С. 93–100.
2. **Корневский, Н. А.** Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования / Н. А. Корневский // *Вестник новых медицинских технологий.* – 2006. – Т. 13, № 2. – С. 6–9.
3. **Златорев, А. М.** Сравнительная оценка эффективности диагностики заболеваний легких на основе дискриминантного анализа и нейронных сетей / А. М. Златорев, Н. Е. Казимилова, М. А. Радченко // *Вестник Саратовского государственного технического университета.* – 2012. – Т. 1, № 2 (64). – С. 322–327.
4. **Leung, M. K. K.** Deep learning of the tissue-regulated splicing code / M. K. K. Leung, H. Y. Xiong, L. J. Lee, B. J. Frey // *Bioinformatics.* – 2014. – Vol. 30, iss. 12. – P. i121–i129.
5. **Астафьев, А. Н.** Применение нейронной сети с направленной активацией нейронных элементов для оценки эффективности лечения гепатита / А. Н. Астафьев, С. Ф. Четвериков // *Труды международного симпозиума Надежность и качество.* – 2016. – Т. 2. – С. 281–283.
6. **Куссуль, М. Э.** Модульное представление нейронных сетей / М. Э. Куссуль // *ММС.* – 2006. – № 4. – С. 51–62.
7. **Newman, M. E. J.** Mixture models and exploratory analysis in networks / M. E. J. Newman, E. A. Leicht // *PNAS.* – 2007. – Vol. 104 (23). – P. 9564–9569.

#### **References**

1. Gerashchenko S. M., Mitin A. A., Gerashchenko S. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 4 (12), pp. 93–100. [In Russian]
2. Korenevskiy N. A. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy* [Bulletin of new medical technologies]. 2006, vol. 13, no. 2, pp. 6–9. [In Russian]
3. Zlatorev A. M., Kazimirova N. E., Radchenko M. A. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University]. 2012, vol. 1, no. 2 (64), pp. 322–327. [In Russian]
4. Leung M. K. K., Xiong H. Y., Lee L. J., Frey B. J. *Bioinformatics*. 2014, vol. 30, iss. 12, pp. i121–i129.
5. Astafev A. N., Chetverikov S. F. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an international symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 281–283. [In Russian]

6. Kussul' M. E. *Matematicheskiye mashiny i sistemy* [Mathematical machines and systems]. 2006, no. 4, pp. 51–62. [In Russian]
7. Newman M. E. J., Leicht E. A. *PNAS*. 2007, vol. 104 (23), pp. 9564–9569.

---

***Астафьев Андрей Николаевич***

ассистент, кафедра физики  
и биомедицинской техники, Липецкий  
государственный технический  
университет (Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, 30)

E-mail: a.n.astafyev@gmail.com

***Astaf'ev Andrey Nikolaevich***

Assistant, sub-department of physics  
and biomedical technology, Lipetsk State  
Technical University (30 Moskovskaya  
street, Lipetsk, Russia)

***Геращенко Сергей Иванович***

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой медицинской  
кибернетики и информатики, Пензенский  
государственный университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mpo@list.ru

***Gerashchenko Sergey Ivanovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of medical  
cybernetics and informatics,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

***Юрков Николай Кондратьевич***

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный  
университет (Россия,  
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kipra@pnzgu.ru

***Yurkov Nikolay Kondrat'evich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of radio  
equipment design and production,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Астафьев, А. Н. Диагностическая система поддержки принятия решения для анализа серологических маркеров гепатита / А. Н. Астафьев, С. И. Геращенко, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 4–13. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-1.

## ГЕНЕРАТОРЫ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НЕМАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ НА РЕГИСТРАХ СДВИГА С ЛИНЕЙНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА ОСНОВЕ ПРИМИТИВНОГО МНОГОЧЛЕНА В СТЕПЕНИ<sup>1</sup>

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Современные методы организации машинных экспериментов в виде имитационных моделей основаны на использовании числовых последовательностей вероятностно-статистической природы, адекватных реальным процессам и явлениям. Цель статьи – продемонстрировать новые возможности генераторов двоичных последовательностей как псевдослучайных, не ограничиваясь реализацией бернуллиевской схемы независимых испытаний.

*Материалы и методы.* Предлагаются малоизученные методы аппаратного формирования двоичных рекуррентных последовательностей генераторами регистрового типа с линейной обратной связью. Математической основой генераторов выбран составной характеристический многочлен, состоящий из примитивных многочленов, один из которых возведен в целочисленную степень.

*Результаты.* Показано, что в однородном и неоднородном режимах работы генератора наблюдается многообразие формируемых последовательностей. Представлены в статистической и функциональной формах корреляционные связи элементов последовательностей. Решена задача инициализации генератора на формирование циклов не максимальной длины данного порядка.

*Выводы.* Предложены аналитические условия и схемотехническая организация генераторов последовательностей не максимальной длины с разнообразными вероятностными и корреляционными свойствами, расширяющими функциональные возможности имитационного эксперимента.

**Ключевые слова:** генератор псевдослучайных последовательностей, регистр сдвига, многообразие последовательностей, однородные и неоднородные последовательности, индикаторные последовательности, корреляционные функции.

V. A. Pesoshin, V. M. Kuznetsov, A. S. Kuznetsova

## PSEUDO-RANDOM SEQUENCE GENERATORS OF NON-MAXIMUM LENGTH ON SHIFT REGISTERS WITH LINEAR FEEDBACK BASED ON A PRIMITIVE POLYNOMIAL OF SOME POWER

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-47-160001.

© Песошин В. А., Кузнецов В. М., Кузнецова А. С., 2019. 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.* Modern methods of organizing machine experiments in the form of simulation models are based on the use of numerical sequences of probabilistic-statistical nature, adequate to real processes and phenomena. The purpose of the article is to demonstrate the new possibilities of binary sequence generators as pseudo-random, not limited to the implementation of the Bernoulli scheme of independent tests.

*Materials and methods.* Poorly studied methods of hardware formation of binary recurrence sequences by register-type generators with linear feedback are proposed. The mathematical basis of the generators is a composite characteristic polynomial consisting of primitive polynomials, one of which is raised to an integer power.

*Results.* It is shown that in homogeneous and inhomogeneous operating modes of the generator, a variety of formed sequences is observed. Correlation relationships of sequence elements are presented in statistical and functional forms. The problem of initializing the generator to form cycles of non-maximum length of a given order is solved.

*Conclusions.* The proposed analytical conditions and circuit design of sequence generators of non-maximum length with various probabilistic and correlation properties that expand the functionality of a simulation experiment.

**Keywords:** pseudo-random sequence generator, shift register, sequence variety, homogeneous and heterogeneous sequences, indicator sequences, correlation functions.

### Введение

Псевдослучайные числовые последовательности широко применяются в различных областях науки и техники. Общего или универсального определения таких последовательностей не существует. Однако их этимология указывает, что «псевдослучайные» – это «как бы случайные, но остающиеся детерминированными». Главное качество псевдослучайных последовательностей (ПСП) – это проявление случайности в рамках заданных ограничений по условиям решаемой задачи.

Наибольшее распространение получили последовательности, реализующие схему независимых испытаний Бернулли. Основные их ограничения оговорены в трех постулатах Голомба, исследованию которых посвящена большая часть работ по ПСП. Элементарным представителем такого типа процессов выступают равновероятностные двоичные некоррелированные последовательности. Типичными сферами их применения являются методы статистических испытаний и алгоритмы защиты информации. Аппаратные формователи или генераторы таких псевдослучайных последовательностей (ГПСП) эффективно реализуются на регистрах сдвига с линейной обратной связью, описываемой примитивными характеристическими многочленами [1–6].

Развитие методов имитационного моделирования, реализация тестовых, контрольно-измерительных, учебно-тренажерных, вибро-стендовых и других испытаний связано с необходимостью формирования последовательностей с неравновероятностным распределением и определенными корреляционными свойствами. Алгоритмы и аппаратура для их получения существенно сложнее, чем для широко распространенного бернуллиевского случая.

В данной статье предлагаются малоизученные методы построения ГПСП, способные формировать набор последовательностей с разными веро-

ятностными и корреляционными свойствами на периодах немаксимальной длины. При этом сохраняется возможность максимального использования хорошо отработанных в инженерной практике регистровых структур и линейной комбинационной логики. Оригинальным и новым является задание неоднородных режимов работы и использование приводимых характеристических многочленов.

### **1. Построение генераторов по схеме Фибоначчи и анализ последовательностей**

Основой построения устройства выбран  $n$ -разрядный регистр сдвига с внешними линейными обратными связями, что образует характерную конфигурацию генератора по схеме Фибоначчи [2–6]. Его работа организована на следующем рекуррентном правиле формирования последовательности  $a$  с дискретным временным аргументом  $t$ :

$$a(t) = C_1 a(t-1) \oplus C_2 a(t-2) \oplus \dots \oplus C_n a(t-n) \oplus \alpha, \quad (1)$$

где для двоичного случая  $a, C_i, \alpha \in \{0, 1\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Указанное рекуррентное правило устанавливается составным характеристическим многочленом, допускающим запись в следующей приводимой форме:

$$\varphi(x) = \varphi_0^m(x) \varphi_1(x), \quad (2)$$

где  $\varphi_0(x)$  и  $\varphi_1(x)$  – примитивные многочлены степени  $m_0$  и  $m_1$  соответственно, причем  $m_0 + m_1 = n$ . Свойство неоднородности задается коэффициентом  $\alpha = 1$ , выполняющим роль оператора инверсии в цепи обратной связи.

В работе [7] доказано, что при  $\alpha = 0$  нахождение периодической структуры (ПС) многочлена  $\varphi_0^m(x)$  сводится к последовательному нахождению ПС всех меньших степеней:

$$\varphi_0(x), \varphi_0^2(x), \dots, \varphi_0^{j-1}(x), \varphi_0^j(x), \dots, \varphi_0^{m-1}(x), \varphi_0^m(x).$$

Множество периодов многочлена  $\varphi_0^j(x)$  состоит из элементов периодической структуры многочлена  $\varphi_0^{j-1}(x)$ ,  $\mu_j$  и дополнительных периодов длины

$$L_0 2^{k_j}, \quad (3)$$

где  $L_0$  – длина минимального периода неприводимого многочлена  $\varphi_0(x)$ ;  $k_j$  – наименьшее целое число, для которого  $2^{k_j} \geq j$ . Тогда для любого неприводимого многочлена  $\varphi_0(x)$  количество дополнительных циклов определится формулой  $\mu_j = 2^{m_0(j-1)}(2^{m_0} - 1) / L_0 2^{k_j}$ . Так как по условиям выражения (2) многочлен  $\varphi_0(x)$  примитивный, то длина его минимального периода совпадает с максимальной длиной или длиной М-последовательности  $L_0 = (2^{m_0} - 1)$ , что упрощает формулу для количества циклов до выражения

$$\mu_j = 2^{(j-1)m_0 - k_j} \tag{4}$$

Принимая для  $j=0$  самый младший элемент ПС в виде моноцикла 1(1), справедливо утверждать, что рост степени многочлена  $\varphi_0(x)$  порождает дополнения циклами к элементам ПС всех младших степеней согласно (3) и (4).

К аналогичному формированию ПС многочлена  $\varphi_0^m(x)$  приходим и при  $\alpha = 1$  [8].

Основной многообразия являются ПСП, содержащие в сложноорганизованном виде прямые М- и инверсные  $\bar{M}$ -последовательности (МП и  $\bar{M}$ П), для которых запрещенными являются моноциклы 0 и 1 соответственно [6].

Рассмотрим простые примеры ГПСП и формируемые ими ПСП при различных значениях  $m_0, m_1$  и  $m$ .

**1.1. Случай  $m_0 = m = 2, m_1 = 0$**

В генераторах Фибоначчи на всех выходах формируются одинаковые последовательности с точностью до начальной фазы в пределах своего периода.

Генератор на основе многочлена

$$\varphi_0(x) = x^2 \oplus x \oplus 1 \tag{5}$$

формирует последовательности с ПС  $\{1(1), 1(3)\}$ , в которой второй элемент определен при значениях  $j=1, L_0 = 2^{m_0} - 1 = 3, 2^{k_1} \geq 1$  и  $k_1 = 0$ , параметрами  $\mu_1 = 1$  и  $2^{k_1} L_0 = 3$  согласно (3) и (4).

Для квадрата трехчлена (5) получаем

$$\varphi_0^2(x) = x^4 \oplus x^2 \oplus 1. \tag{6}$$

Степень трехчлена в форме функции  $\varphi_0(x)$  возрастает на 1, т.е.  $j=2$ , а ПС дополняется двумя циклами длиной 6, так как выражения (3) и (4) при  $L_0 = 2^{m_0} - 1 = 3$  и  $2^{k_2} \geq 2$  определяют  $k_2 = 1, \mu_2 = 2^{m_0 - 1} = 2$  и  $2^{k_2} L_0 = 6$ . Таким образом, ПС многочлена (6) равна  $\{1(1), 1(3), 2(6)\}$ .

Схема генератора на основе многочлена (6) представлена на рис. 1.

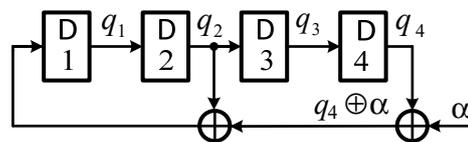


Рис. 1. Схема ГПСП на основе характеристического многочлена (6)

Моделирование при различных начальных состояниях (НС) регистра сдвига и  $\alpha = 0$  позволяет получить следующие два дополнительных цикла:

$$0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1 \tag{7}$$

и

$$001111, \tag{8}$$

соответствующих элементу 2(6) полной ПС.

Выявим связь этих последовательностей с МП, порождаемой исходным многочленом (5). Для этого получим по две последовательности таким образом, чтобы первая состояла из символов, стоящих на 1, 3, 5 позициях, вторая – на 2, 4, 6 позициях:

$$000101 \tag{7a}$$

$$0-0-0-,$$

$$-0-1-1,$$

$$001111 \tag{8a}$$

$$0-1-1-,$$

$$-0-1-1.$$

Из разложения видно, что последовательность (7) состоит из МП и константы 0, а последовательность (8) – из двух МП.

При  $\alpha = 1$  формируются инверсные им последовательности (7a) и (8a), причем последовательность (7a) состоит из  $\overline{\text{МП}}$  и константы 1, а (8a) – только из  $\overline{\text{МП}}$ .

**Отметим, что ПСП содержат в сложно организованном виде не только МП и  $\overline{\text{МП}}$ , но и константы 0 и 1, которые, как увидим далее, вносят существенные особенности в формируемые последовательности.**

### 1.2. Случай $m_0 = 2, m = 3, m_1 = 0$

Многочлен  $\varphi_0^3(x) = (x^2 \oplus x \oplus 1)^3$  как куб квадратного трехчлена представим дополнительной степенью многочлена (6) из разд. 1.1:

$$(x^2 \oplus x \oplus 1)^3 = (x^2 \oplus x \oplus 1)^2(x^2 \oplus x \oplus 1) = x^6 \oplus x^5 \oplus x^3 \oplus x \oplus 1, \tag{9}$$

которому соответствуют элементы ПС квадрата квадратного трехчлена  $\{1(1), 1(3), 2(6)\}$ . Тогда возникает дополнительный элемент 4(12), так как при  $j = 3$  и  $2^{k_3} \geq 3$  по (3) и (4) нетрудно определить  $k_3 = 2, \mu_3 = 2^{2m_0-2} = 4$  и  $2^{k_3} L_0 = 12$ . Таким образом, полная ПС многочлена (9) выразится как  $\{1(1), 1(3), 2(6), 4(12)\}$ .

Схема соответствующего генератора приведена на рис. 2.

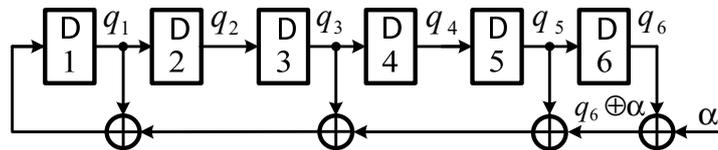


Рис. 2. Схема ГПСП на основе характеристического многочлена (9)

Рассмотрим связь четырех дополнительно сформированных при разных НС однородных ( $\alpha = 0$ ) последовательностей с МП:

$$\mathbf{00001110111} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} &0---0---0---, \\ &-0---1---1--, \\ &>--0---1---1-, \\ &---0---1---1, \end{aligned}$$

$$\mathbf{000010011001} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &0---1---1---, \\ &-0---0---0--, \\ &>--0---0---0-, \\ &---0---1---1, \end{aligned}$$

$$\mathbf{001011111101} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &0---1---1---, \\ &-0---1---1--, \\ &>--1---1---0-, \\ &---0---1---1, \end{aligned}$$

$$\mathbf{000110101011} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} &0---1---1---, \\ &-0---0---0--, \\ &>--0---1---1-, \\ &---1---0---1. \end{aligned}$$

Как видим, формируются **равновероятностные** последовательности (10) и (13), **особенностью которых является содержание трех МП и одной константы 0**. Неравновероятностные последовательности (11) и (12) содержат две МП и две константы 0, и только МП соответственно.

При  $\alpha = 1$  рассматриваемый генератор Фибоначчи формирует неоднородные последовательности, совпадающие в данном случае с инверсными (10)–(13), которые обозначим как (10а)–(13а). Отметим, что **равновероятностные** последовательности (10а) и (13а) **содержат три МП и одну константу 1**.

### 1.3. Случай $m_0 = 2, m = 4, m_1 = 0$

Заданный многочлен  $\varphi_0^4(x)$ , аналогично предыдущим случаям, запишем как дополнительную степень куба квадратного трехчлена вида

$$(x^2 \oplus x \oplus 1)^4 = (x^2 \oplus x \oplus 1)^3(x^2 \oplus x \oplus 1) = x^8 \oplus x^4 \oplus 1. \quad (14)$$

Тогда дополнением к циклам  $\varphi_0^3(x)$  с учетом  $j=4$  и определением  $2^{k_4} \geq 4$ ,  $k_4=2$  по (3) и (4) будет  $\mu_4 = 2^{3m_0-2} = 16$  и  $2^{k_4}L_0 = 12$ . С учетом этих дополнительных 16 последовательностей длиной 12 многочлен (14) приобретает полную ПС вида

$$\{1(1),1(3),2(6),4(12),16(12)\}=\{1(1),1(3),2(6),20(12)\}.$$

Соответствующая данному случаю схема ГПСП приведена на рис. 3.

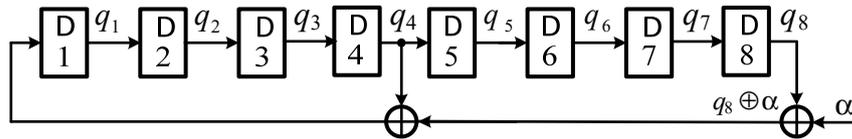


Рис. 3. Схема ГПСП на основе характеристического многочлена (14)

Формируемые неоднородным генератором последовательности для рассматриваемого случая вместе с предыдущими циклами представлены в табл. 1.

Таблица 1

Формируемые последовательности генератором при многочлене  $\varphi_0^m(x) = (x^2 \oplus x \oplus 1)^m$  для  $m = \overline{1, 4}$  и  $\alpha = 1$

Степень многочлена	ПС	Последовательности
1	$\{1(1),1(3)\}$	1, 1)001
2	$\{1(1),1(3),2(6)\}$	1, 001, 1)000011, 2)010111
3	$\{1(1),1(3),2(6),4(12)\}$	1, 001, 000011, 010111, 1)000000101101, 2) <b>000100011111</b> , 3) <b>001010100111</b> , 4)001101111011
4	$\{1(1),1(3),2(6),4(12),16(12)\}$	1, 001, 000011, 010111, 000000101101, <b>000100011111</b> , <b>001010100111</b> , 001101111011, 1)000000001111, 2)000001101001, 3)000001001011, 4)000010000111, 5)000010100101, 6) <b>000100111101</b> , 7) <b>000101011011</b> , 8) <b>000100111101</b> , 9) <b>000110010111</b> , 10) <b>000110110101</b> , 11) <b>000111010011</b> , 12) <b>001001101011</b> , 13)001100111111, 14)001110110111, 15)010101011111, 16) 011101111111.

В табл. 1 последовательности при рассматриваемой степени многочлена, которые появились в дополнение к степени на единицу меньшей, пронумерованы со скобками. Равновероятностные циклы выделены жирным шрифтом.

По аналогии могут быть получены ПС и исследованы последовательности полноразмерного формата для практического применения за счет увеличения показателей степени  $m_0$  и  $m_1$ .

**2. ГПСП не максимальной длины на основе приводимого характеристического многочлена, содержащего все ненулевые степени сомножителей**

Рассмотрим генераторы, формирующие необходимое разнообразие ПСП на основе приводимого характеристического многочлена вида (2) с ненулевыми степенями, например,  $m_0 = 2$  и  $m = m_1 = 3$ . Пусть многочлен  $\varphi_0^3(x) = x^6 \oplus x^5 \oplus x^3 \oplus x \oplus 1$  имеет ПС  $\{1(1), 1(3), 2(6), 4(12)\}$ , а  $\varphi_1(x)$  степени  $(n - 6) \geq 2 - \{1(1), 1(2^{n-6} - 1)\} = \{1(1), 1(7)\}$ . Взаимодействие обеих ПС обеспечивают многочлену  $\varphi(x)$  в целом следующую ПС:

$$\begin{aligned} & \{1(1), 1(3), 2(6), 4(12), 1(2^{n-6} - 1), 1(3 \cdot (2^{n-6} - 1)), 2(6 \cdot (2^{n-6} - 1)), 4(12 \cdot (2^{n-6} - 1))\} = \\ & = \{1(1), 1(3), 2(6), 4(12), 1(7), 1(21), 2(42), 4(84)\}. \end{aligned} \quad (15)$$

Последовательности с ПС  $\{1(1), 1(3), 2(6), 4(12)\}$  образуют нерабочие (запрещенные) циклы и иницируют формирование рабочих ПСП с ПС:

$$\{1(2^{n-6} - 1), 1(3(2^{n-6} - 1)), 2(6(2^{n-6} - 1)), 4(12(2^{n-6} - 1))\}.$$

Рассмотрим случай, когда  $\varphi_1(x) = x^3 \oplus x \oplus 1$ . Тогда для ГПСП в форме (2):  $\varphi(x) = (x^6 \oplus x^5 \oplus x^3 \oplus x \oplus 1)(x^3 \oplus x \oplus 1) = x^9 \oplus x^8 \oplus x^7 \oplus x^6 \oplus x^5 \oplus x^2 \oplus 1$ . (16)

ПС рабочих последовательностей (РП) определим из (15) как

$$\{1(7), 1(21), 2(42), 4(84)\} = \{1(7), 1(3 \cdot 7), 2(6 \cdot 7), 4(12 \cdot 7)\}.$$

Моделированием получены последовательности с периодами 21, 42 и 84 при  $\alpha = 1$ , которые приведены ниже (с периодами 42 и 84 по одной):

$$,010101100111011110000 \quad (17)$$

$$,011110001101100100010000101011011111001, \quad (18)$$

$$,011001100110001110110101101001001111101000000101001101010110101001100000011, \quad (19)$$

Рассмотрим связь последовательности (17) с МП и  $\bar{М}П$ . Для этого определим три последовательности: первая из символов, стоящих на 1, 4, 7, ... , вторая – на 2, 5, 8, ..., третья – на 3, 6, 9, ... и т.д. позициях:

$$\begin{aligned} & ,010101110011110111110000, \\ & ,0--1--1--1--0--1--0--, \text{ МП} \\ & , -1--0--0--1--1--1--0-, \text{ МП} \\ & , --0--1--0--1--1--0--0-, \bar{М}П \end{aligned}$$

Последовательность (17) с периодом 21 организована и упорядочена из элементов двух МП и одной  $\bar{M}П$ , запрещенные последовательности в которых соответствуют циклу 1) 001 в табл. 1 при степени многочлена  $m=1$ . Для идентификации выходных последовательностей, не производя их потактное моделирование, целесообразно использовать запрещенные циклы в качестве индикаторных последовательностей (ИП) [3].

Для последовательности (18) с периодом 42 ИП являются 000011. Поэтому они содержат четыре МП и две  $\bar{M}П$ . Упорядоченность элементов МП и  $\bar{M}П$  в формируемой равновероятностной последовательности с периодом 84 соответствует ИП 000100111101. Сложная упорядоченность МП и  $\bar{M}П$  порождается многочленом  $\varphi_1(x) = x^3 \oplus x \oplus 1$  в форме (2).

### 3. Вероятностные и корреляционные свойства ПСП

Вероятностные свойства ПСП на выходах генераторов зависят от количества входящих в их состав МП и  $\bar{M}П$ , определяемого ЗС, которые порождаются многочленом  $\varphi_1(x)$  степени  $m_1$ . Так, при ЗС 00...0 вероятность определяется МП, при 11...1 – вероятностью  $\bar{M}П$ . Если ЗС содержит равное количество 0 и 1, то выходные последовательности равновероятны.

Корреляционные свойства формируемых последовательностей также отличаются разнообразием. Периодические автокорреляционные функции (ПАКФ)  $r(\tau)$  последовательностей в общем случае вычисляются по следующей формуле [3]:

$$r(\tau) = \frac{n_{\text{ц}} n_{11}(\tau) - n_1^2}{n_1(n_{\text{ц}} - n_1)}, \quad (20)$$

где  $\tau$  – временной сдвиг как аргумент функции;  $n_1$  и  $n_{11}(\tau)$  – количество единиц и пар единиц на периоде  $n_{\text{ц}}$ .

Для равновероятностных последовательностей ПАКФ  $r(\tau)$  имеет вид [3]:

$$r(\tau) = \frac{n_{\text{с}}(\tau) - n_{\text{н}}(\tau)}{n_{\text{ц}}}, \quad (21)$$

где  $n_{\text{с}}(\tau)$  – количество совпадающих, а  $n_{\text{н}}(\tau)$  – несовпадающих символов на периоде  $n_{\text{ц}}$  при сдвиге  $\tau$ .

В табл. 2 приведены малоразмерные примеры ПСП с максимальным периодом 12 из табл. 1 со значениями ПАКФ  $r(\tau)$ , представленных на половине периода по оси аргумента  $\tau$ . Вторая половина функций повторяет первую половину симметрично середине периода при  $\tau=6$ , соответствующему серому столбцу табл. 2. Строки таблицы обозначены комбинацией минимальной степени  $m$  многочлена  $\varphi_0(x)$  и номером последовательности в табл. 1.

В табл. 3 приведены ПАКФ неравновероятностных последовательностей (17), (18) и равновероятностной (19), которые вычислялись по формулам (20) и (21) соответственно.

Таблица 2

ПАКФ  $r(\tau)$

m.№	Последовательности	Аргументы автокорреляционных функций						Вероятности
		$\tau = 1$	$\tau = 2$	$\tau = 3$	$\tau = 4$	$\tau = 5$	$\tau = 6$	
1.1	001(001001001)	-0,5	-0,5	1	-0,5	-0,5	1	0,33
2.1	000011(000011)	0,25	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1	0,33
2.2	010111(010111)	-0,5	0,25	-0,5	0,25	-0,5	1	0,67
3.1	000000101101	-0,125	0,25	0,25	-0,5	-0,125	-0,5	0,33
3.3	<b>001010100111</b>	-0,33	0	-0,33	0	0,33	-0,33	<b>0,5</b>
4.1	000000001111	0,625	0,25	-0,125	-0,5	-0,5	-0,5	0,33
4.5	000010100101	-0,5	0,25	-0,125	-0,5	0,625	-0,5	0,33
4.8	<b>000100111101</b>	0	0	0	0	-0,33	-0,33	<b>0,5</b>
4.9	<b>000110010111</b>	0	-0,33	-0,33	0	0	0,33	<b>0,5</b>
4.11	<b>000111010011</b>	-0,33	-0,33	0,33	0	-0,33	0,33	<b>0,5</b>
4.14	001110110111	-0,125	-0,5	-0,125	0,25	0,25	-0,5	0,67
4.16	011101111111	-0,2	-0,2	-0,2	0,4	-0,2	-0,2	0,83

Таблица 3

ПАКФ  $r(\tau)$  последовательностей (17) на полном периоде,  
(18) – на половине периода и (19) – на четверти периода

$\tau$	(17)	(16)	(17)
1	0,045	-0,050	0
2	0,045	0,045	0
3	-0,145	0,045	0
4	0,045	0,045	0
5	0,045	-0,050	0,048
6	-0,145	-0,145	0,048
7	-0,336	0,332	-0,333
8	0,045	0,045	0
9	-0,145	0,045	0
10	0,045	0,045	0
11	0,045	-0,050	0
12	-0,145	-0,145	-0,143
13	0,045	-0,050	0
14	-0,336	0,332	0
15	-0,145	0,045	0
16	0,045	0,045	0
17	0,045	-0,050	0,048
18	-0,145	-0,145	0,048
19	0,045	-0,050	0,048
20	0,045	0,045	0
21	1	0,332	0

**Заключение**

Исследованы однородные и неоднородные генераторы на регистре сдвига с внешними линейными обратными связями (генераторы Фибоначчи), формирующие псевдослучайные последовательности не максимальной длины

на основе характеристического многочлена вида  $\varphi(x) = \varphi_0^m(x) \varphi_1(x)$  степени  $n$ , где  $\varphi_0(x)$  и  $\varphi_1(x)$  – примитивные многочлены степени  $m_0$  и  $m_1$  соответственно, причем  $m_0 m_1 = n$ . Определены периодические структуры многочленов  $\varphi_0^m(x)$  и  $\varphi(x)$ .

Впервые показано, что ПСП на основе многочлена  $\varphi_0^m(x)$  содержат в сложноорганизованном виде не только МП и  $\overline{\text{МП}}$ , но и константы 0 и 1, которые позволяют порождать последовательности как равновероятностного типа, так и не равновероятностного. На примерах малоразрядных генераторов представлены вероятностные и автокорреляционные свойства формируемых ПСП.

Рассмотрены генераторы Фибоначчи на основе приводимого характеристического многочлена  $\varphi(x)$ , содержащего все ненулевые степени сомножителей. Определены нерабочие (запрещенные) циклы, которые иницируют формирование рабочих ПСП. Эти циклы можно использовать в качестве индикаторных последовательностей для идентификации рабочих последовательностей. Разнообразие корреляционных и вероятностных свойств способствуют использованию рассмотренных последовательностей в имитационном моделировании.

#### **Библиографический список**

1. **Иванов, М. А.** Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей / М. А. Иванов, И. В. Чугунков. – Москва : КУДИЦ-ОБРАЗ, 2003. – 240 с.
2. **Кузнецов, В. М.** Генераторы равновероятностных псевдослучайных последовательностей на регистрах сдвига / В. М. Кузнецов, В. А. Песошин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 21–28.
3. **Кузнецов, В. М.** Генераторы случайных и псевдослучайных последовательностей на цифровых элементах задержки / В. М. Кузнецов, В. А. Песошин. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. – 336 с.
4. **Песошин, В. А.** Генераторы равновероятностных псевдослучайных последовательностей не максимальной длины на основе регистра сдвига / В. А. Песошин, В. М. Кузнецов, А. С. Кузнецова, А. Р. Шамеева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 1 (49). – С. 5–19.
5. **Pesoshin, V. A.** Generators of the equiprobable pseudorandom nonmaximal-length sequences based on linear-feedback shift registers / V. A. Pesoshin, V. M. Kuznetsov, D. V. Shirshova // Automation and Remote control. 2016. – Vol. 77, № 9. – P. 1622–1631.
6. **Pesoshin, V. A.** Pseudo-random sequences with nonmaximal length based on the shift register and reducible polynomial // V. A. Pesoshin, V. M. Kuznetsov, A. K. Rakhmatullin // MPMAM-2019. Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1352, № 1.
7. **Элспас, Б.** Теория автономных линейных последовательных сетей / Б. Элспас // Кибернетический сборник. – Вып. 7. – Москва : ИЛ, 1963. – С. 90–128.
8. **Кугураков, В. С.** Множество длин циклов взаимнооднозначных аффинных отображений пространства  $V^n$  ( $\text{GF}(p)$ ) на себя / В. С. Кугураков, О. Б. Соколов // Ученые записки Казанского государственного университета. – 1969. – Т. 129, № 4. – С. 74–79.

### References

1. Ivanov M. A., Chugunkov I. V. *Teoriya, primeneniye i otsenka kachestva generatorov psevdosluchaynykh posledovatel'nostey* [Theory, application and quality assessment of pseudo-random sequence generators]. Moscow: KUDITs-OBRAZ, 2003, 240 p. [In Russian]
2. Kuznetsov V. M., Pesoshin V. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 1 (21), pp. 21–28. [In Russian]
3. Kuznetsov V. M., Pesoshin V. A. *Generatory sluchaynykh i psevdosluchaynykh posledovatel'nostey na tsifrovyykh elementakh zaderzhki* [Random and pseudo-random sequence generators on digital delay elements]. Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2013, 336 p. [In Russian]
4. Pesoshin V. A., Kuznetsov V. M., Kuznetsova A. S., Shameeva A. R. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2019, no. 1 (49), pp. 5–19. [In Russian]
5. Pesoshin V. A., Kuznetsov V. M., Shirshova D. V. *Automation and Remote control*. 2016, vol. 77, no. 9, pp. 1622–1631.
6. Pesoshin V. A., Kuznetsov V. M., Rakhmatullin A. K. *MMPAM-2019. Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1352, no. 1.
7. Elspas B. *Kiberneticheskiy sbornik* [Cybernetic collection]. Issue 7. Moscow: IL, 1963, pp. 90–128. [In Russian]
8. Kugurakov V. S., Sokolov O. B. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Kazan State University]. 1969, vol. 129, no. 4, pp. 74–79. [In Russian]

---

#### ***Песошин Валерий Андреевич***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра компьютерных систем,  
Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет имени А. Н. Туполева–КАИ  
(Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)

E-mail: pesoshin-kai@mail.ru

#### ***Pesoshin Valeriy Andreevich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of computer systems,  
Kazan National Research Technical  
University named after A. N. Tupolev – KAI  
(10 K. Marksa street, Kazan, Russia)

#### ***Кузнецов Валерий Михайлович***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра компьютерных систем,  
Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет имени А. Н. Туполева–КАИ,  
(Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)

E-mail: kuznet\_evm@mail.ru

#### ***Kuznetsov Valeriy Mikhailovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of computer systems,  
Kazan National Research Technical  
University named after A. N. Tupolev – KAI  
(10 K. Marksa street, Kazan, Russia)

#### ***Кузнецова Александра Сергеевна***

студент, Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет имени А. Н. Туполева–КАИ,  
(Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)

E-mail: sasha\_kzncv@mail.ru

#### ***Kuznetsova Aleksandra Sergeevna***

Student, Kazan National Research  
Technical University named after  
A. N. Tupolev – KAI (10 K. Marksa  
street, Kazan, Russia)

**Образец цитирования:**

Песошин, В. А. Генераторы псевдослучайных последовательностей не максимальной длины на регистрах сдвига с линейной обратной связью на основе примитивного многочлена в степени / В. А. Песошин, В. М. Кузнецов, А. С. Кузнецова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 14–26. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-2.

## ОРГАНИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЛАЧНО-СЕТЕВЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С АРХИТЕКТУРОЙ «АГЕНТЫ КАК СЕРВИСЫ»

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* На концептуальном уровне проектирования распределенной вычислительной системы могут быть предложены различные схемы взаимодействий клиентов с серверами, при реализации которых клиенты по-разному обращаются к одному или к группе серверов. Актуальной является проблема организации подобных взаимодействий в облачно-сетевых распределенных вычислительных системах (ОС РВС) и переход от концептуального представления функциональной архитектуры к сетевым приложениям. Объектом исследования являются ОС РВС. Предметом исследования является методика синтеза функциональной архитектуры подобных систем. Целью исследования является решение актуальной задачи по расширению функциональных возможностей ОС РВС, объединяющих в себе свойства собственно облачных и грид-систем со свойствами мультиагентных систем. Особенностью предлагаемой новой функциональной архитектуры является то, что в аренду пользователю предоставляются мобильные агенты, выполняющие заданные функции.

*Материалы и методы.* Исследования выполнены на основе сетевой компьютерной интерпретации исполнимых логико-алгебраических моделей и аппарата логических сетей Петри.

*Результаты.* Предложена концепция построения ОС РВС, основанная на формализации перехода от облачной архитектуры «функция как сервис» (FaaS – Function-as-a-Service) к новой архитектуре «агент как сервис» (AaaS – Agent-as-a-Service). Предложена формализация функциональной архитектуры ОС РВС системами логико-алгебраических операционных выражений (ЛАОВ), относящихся к классу исполнимых моделей и пригодных для непосредственной программной реализации в сетевой компьютерной среде; дополнительным свойством ЛАОВ является возможность реконфигурации (модификации режима функционирования) результирующего сетевого программного обеспечения. Предложена методика отображения системы логико-алгебраических операционных выражений на архитектуру компьютерной сети, учитывающая регулярный характер модели.

*Выводы.* Методика синтеза облачных систем с новой архитектурой AaaS, основанная на формализованных логико-алгебраических спецификациях, позволяет ускорить создание программного обеспечения и расширить функциональные возможности рассматриваемых систем.

**Ключевые слова:** облачно-сетевые системы, агенты, сервисы, мультиагентные системы, модифицированные сети Петри, логико-алгебраические спецификации.

## FUNCTIONING ORGANIZATION OF THE CLOUD-NETWORK DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEMS WITH THE ARCHITECTURE “AGENTS AS THE SERVICES”

### **Abstract.**

*Background.* At the conceptual level of designing a distributed computing system, there can be proposed various schemes of client interactions with servers, in the implementation of which clients differently access one or a group of servers. An urgent problem is the organization of such interactions in cloud-based distributed computing systems (CB DCS) and the transition from a conceptual representation of the functional architecture to network applications. The object of the study is the CB DCS. The subject of the research is the synthesis technique of the functional architecture of such systems. The aim of the study is to solve the urgent task of expanding the functionality of the CB DCS, combining the properties of the actual cloud and grid systems with the properties of multi-agent systems. A feature of the proposed new functional architecture is that mobile agents performing specified functions are provided for rent to the user.

*Materials and methods.* The studies were performed on the basis of a networked computer interpretation of executable logical-algebraic models and apparatus of logical Petri nets.

*Results.* The concept of building the CB DCS based on the formalization of the transition from the cloud-based architecture of FaaS – Function-as-a-Service to the new architecture AaaS – Agent-as-a-Service is proposed. The formalization of the functional architecture of the CB DCS based on the systems of logical-algebraic operational expressions (LAOE), belonging to the class of executable models and suitable for direct software implementation in a networked computer environment, is proposed; an additional property of LAOE is the possibility of reconfiguration (modification of the operating mode) of the resulting network software. A technique for mapping a system of logical-algebraic operational expressions onto a computer network architecture that takes into account the regular nature of the model is proposed.

*Conclusions.* The synthesis technique of cloud systems with the new AaaS architecture, based on formalized logical-algebraic specifications, allows you to speed up the creation of software and expands the functionality of the systems in question.

**Keywords:** cloud-based network systems, agents, services, multi-agent systems, modified Petri nets, logical-algebraic specifications.

### **Введение**

В практике проектирования распределенных вычислительных систем (РВС) и сетевых приложений редко используются так называемые исполнимые модели, основанные на формализованных спецификациях системной и функциональной архитектуры распределенных систем. При проектировании РВС разработчики опираются в основном на свою интуицию и опыт предыдущих разработок. Целью настоящей работы является разработка методики синтеза приложений для распределенных виртуальных облачно-сетевых РВС (ОС РВС) с системной и функциональной архитектурой, соответствующей запросам пользователей. В основу методики положено использование исполнимых моделей, основанное агентно-ориентированном подходе, логико-

алгебраических формализованных спецификациях, получаемых на базе сетевой компьютерной интерпретации логических сетей Петри. Предложенная методика позволяет отобразить системы логико-алгебраических операционных выражений на архитектуру компьютерной сети.

### **1. Применение агентно-ориентированного подхода AaaS (Agent-as-a-Service) в облачно-сетевых средах типа SaaS (Software-as-a-Service) и FaaS (Function-as-a-Service)**

Программное обеспечение как сервис (SaaS – Software-as-a-Service) предоставляет возможность пользователям подключаться к облачным приложениям и использовать их через Интернет [1, 2]. Облачный сервис SaaS позволяет организациям быстро запускать приложения с минимальными предварительными расходами. Агентно-ориентированный подход к построению облачно-сетевых вычислительных сред (AaaS – Agent-as-a-Service) может позволить пользователю не только арендовать, но и самому запускать в сеть приложения, существующие в форме взаимодействующих мобильных агентов.

Подход, развиваемый в настоящей работе, пригоден для реализации на базе многих существующих платформах мобильных агентов, управляющих функционированием агентов [3, 4]. Известен ряд инструментальных средств и языков для агентно-ориентированного программирования. Для реализации архитектуры ОС PBC типа AaaS большой интерес представляют агентные платформы, базирующиеся на кроссплатформенном языке Java [5–7]: Agent Factory, AgentBuilder, AgentScape, Aglets, AGLOBE, Cougaar, CybelePro, EMERALD, JACK, JADE, Jadex, Jason, JIAC, Jas, MASON, SeSAM, Swarm и др. В настоящей работе учитываются основные свойства открытых платформ мобильных агентов JADE и Aglets, хорошо зарекомендовавшие себя при создании сетевых, метакомпьютерных и других видов Internet-приложений [8–16].

Агентно-ориентированный подход в данной работе предлагается совместить с так называемым бессерверным подходом, обеспечивающим гибкость системы и малую связность компонентов, что позволяет расширять ее функциональные возможности за счет использования основных свойств и особенностей мобильных агентов.

Бессерверный подход (serverless), практически эквивалентный FaaS-подходу (Function-as-a-Service – функция как сервис) [17–21] основан на известной облачной модели, в которой платформа берет на себя функции распределения машинных ресурсов между клиентами. При традиционном подходе запрос «тонкого» клиента вызывает некоторые службы, размещенные на сервере. При новом подходе в подобных системах программными компонентами реализуются функции, которые исполняют запросы к платформе и получают доступ к ее ресурсам. Данная архитектура обеспечивает широкие возможности для удовлетворения требований клиентов, упрощает процессы адресации, анализа емкости хранилища и выделения вычислительных мощностей. Платформа облачной среды занимается настройкой сервера и распределением машинных ресурсов между собой и другими пользователями.

В работе [19] предлагается архитектура облачной системы NFaaS (Named-Function-as-a-Service – именованные функции как сервис), в которой в качестве сервисов используются именованные функции, которые могут быть загружены и запущены любым узлом в сети. Функции могут переме-

щаться между узлами в соответствии с требованиями пользователя. Компоненты хранилища, используемые в данной облачной системе, отвечают не только за хранение функций, но и за принятие решений о том, какие функции запускать. Архитектура NFaaS построена на основе протокола маршрутизации и использует ряд стратегий пересылки для развертывания и динамической миграции функций внутри сети. Однако при реализации данной платформы не используются агентно-ориентированные технологии, применение которых поможет упростить управление процессами поиска и выполнения функций.

Облачная модель FaaS функционирует следующим образом [21]:

1. Клиент делает запрос к серверной вычислительной платформе для выполнения определенной функции.
2. Серверная вычислительная платформа проверяет, работает ли данная функция на каком-либо из ее серверов. Если функция еще не инициализирована, то платформа загружает ее из хранилища данных.
3. Платформа разворачивает функцию на одном из своих серверов, которые предварительно сконфигурированы со средой исполнения.
4. Выполняется функция и фиксируется результат.
5. Результат возвращается клиенту.

Формально архитектура облачно-сетевых сервисов типа AaaS определяется отношением, являющимся областью истинности бинарного предиката

$$U_{AaaS}: F \times A \rightarrow \{\mathbf{true}, \mathbf{false}\},$$

где  $F$  – множество функций-сервисов;  $A$  – множество мобильных агентов, реализующих эти сервисы.

Изменяемая архитектура AaaS фиксируется путем выполнения множества правил модификации предиката  $U_{AaaS}$  следующего вида:

$$U_{AaaS}(F_i, a_j) \leftarrow b,$$

где  $b$  – булев терм;  $F_i \in F$ ,  $a_j \in A$ . При  $b = \mathbf{true}$  функция  $F_i$  связывается с агентом  $a_j$ , а при  $b = \mathbf{false}$  эта связь не реализуется или разрывается. Если принято, что каждая функция реализуется одним агентом, то отношение связности должно иметь функциональный характер. Один и тот же агент может реализовывать несколько функций. Рисунок 1 иллюстрирует закрепление функций за агентами в мультиагентной системе, реализующей архитектуру ОС PBC типа AaaS. Здесь  $A_0$  – агент-менеджер, в функции которого входит создание клонов остальных «облачных» агентов и наделение их требуемой функциональностью. Минимальные требования к агентам – реализация требуемых функций и способность выполнять операции, проиллюстрированные рис. 2.

Способы конкретной реализации процессов в мультиагентных системах описаны в работах [8, 9, 16] и характерны для многих мультиагентных платформ. В данной работе предполагается, что в мультиагентной системе выполняются операции создания копий (клонов) агентов, обмена сообщениями между агентами, перемещения агентов на новый узел сети, обмена данными и их копиями.

Размещение агентов и организацию связей между агентами и узлами в вычислительной сети иллюстрирует рис. 3.

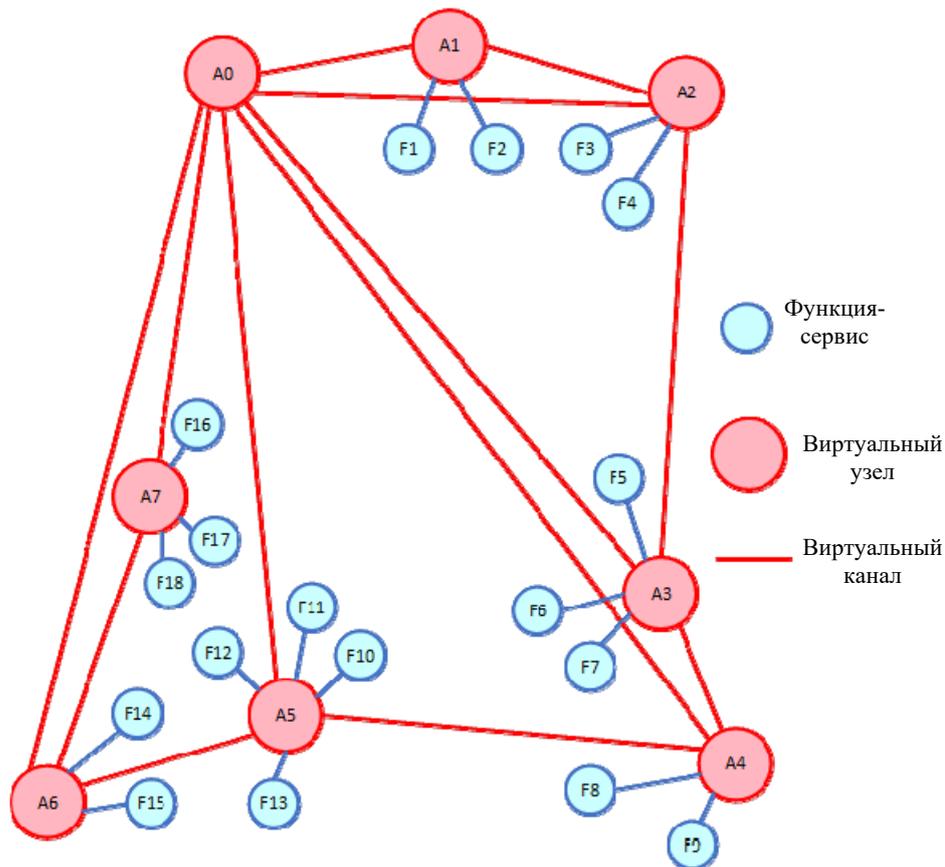


Рис. 1. Многофункциональная мультиагентная система, реализующая архитектуру AaaS

Виртуальные связи в реальной компьютерной TCP/IP сети на сетевом уровне реализуются при помощи коммутаторов и маршрутизаторов. Агенты и сообщения в данной системе могут перемещаться по произвольным маршрутам. Например, агент  $A_0$ , размещенный в узле 2, может передавать свои клоны и сообщения по кольцу физических узлов  $\langle 3, 5, 7, 22, 26, 20, 17, 12 \rangle$  или по хордам  $\langle 3, 5 \rangle, \langle 3, 7 \rangle, \langle 3, 22 \rangle, \langle 3, 26 \rangle, \langle 3, 20 \rangle, \langle 3, 17 \rangle, \langle 3, 12 \rangle$ .

## 2. Абстрактный и структурный синтез функциональной архитектуры распределенных вычислительных систем на основе логико-алгебраической интерпретации реконфигурируемых сетей Петри

По существу, для организации ОС PBC с архитектурой AaaS «агент как сервис» достаточно использовать архитектуры «клиент–сервер» или «клиент–агент–сервер». Мультиагентные платформы возможно также реализовать с применением пиринговых технологий P2P (peer-to-peer) [22], используемых также в файлообменных системах. Архитектура P2P похожа на архитектуры «клиент–сервер» и «клиент–агент–сервер» с тем различием, что размещенный на узле вычислительной сети программный модуль или агент может поочередно выполнять функции как клиента, так и сервера. В этой связи далее рассматривается сетевая архитектура ОС PBC, включающей в свой состав

клиентскую (возможно, беспроводную и мобильную) сеть и TCP/IP сеть – облачный фрагмент Internet Cloud сети Internet. На концептуальном уровне проектирования могут быть предложены различные схемы взаимодействий клиентов с серверами, при реализации которых клиенты по-разному обращаются к одному или к группе серверов при реализации обменов функциями согласно рис. 2 и 3. На рис. 4 представлена упрощенная концептуальная модель взаимодействий нескольких агентов-клиентов  $C_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) с несколькими агентами-серверами  $R_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) в многосерверной системе «клиент–агент–сервер». Здесь принято, что данная архитектура доступа агентов-клиентов к агентам-серверам, далее называемым просто клиентами и серверами, реализуется через составную TCP/IP сеть.

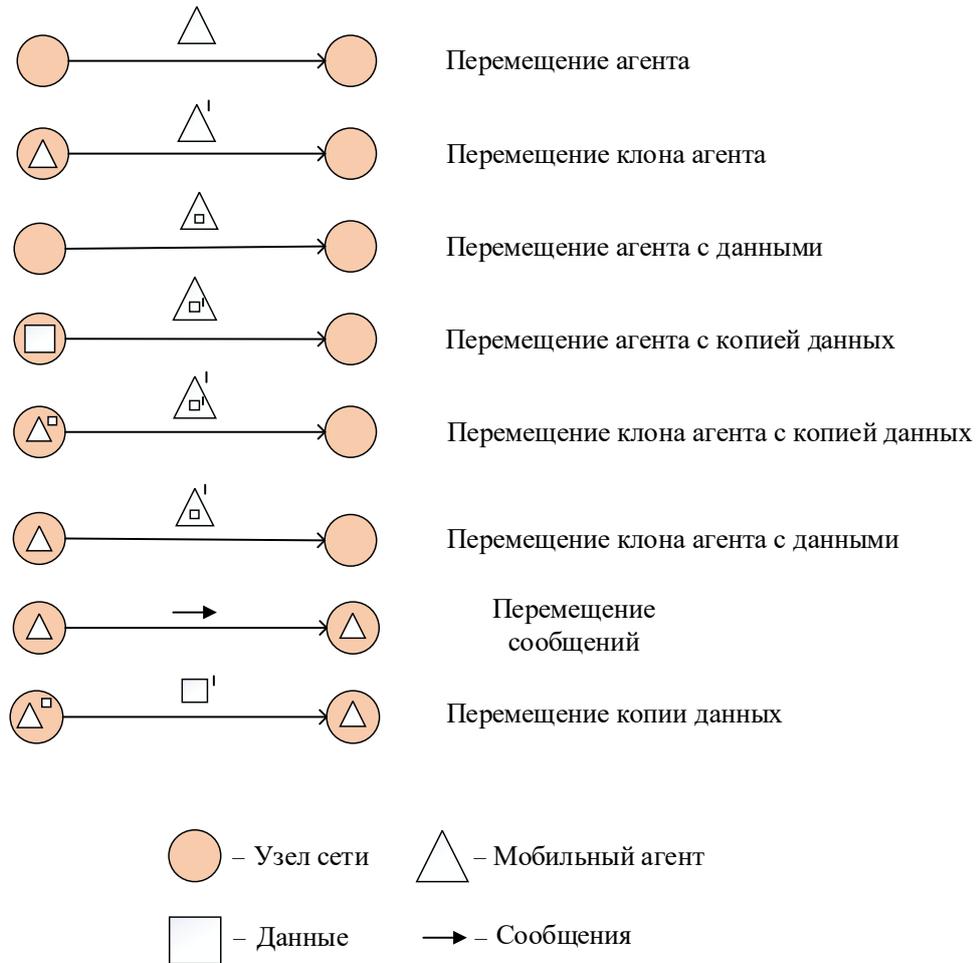


Рис. 2. Разновидности способов перемещения агентов и данных в агентно-ориентированных сетях

Рассматриваемая далее методика абстрактного и структурного синтеза функциональной архитектуры ОС РВС на основе логико-алгебраической интерпретации реконфигурируемых сетей Петри для ряда других сетевых систем была ранее предложена в работах [23–27] с тем существенным отличии-

ем, что согласно новой методике формализованы сетевые обмены сообщениями и агентами. Поэтому определенные далее формализмы имеют более широкую область применения, чем описанные в отмеченных работах.

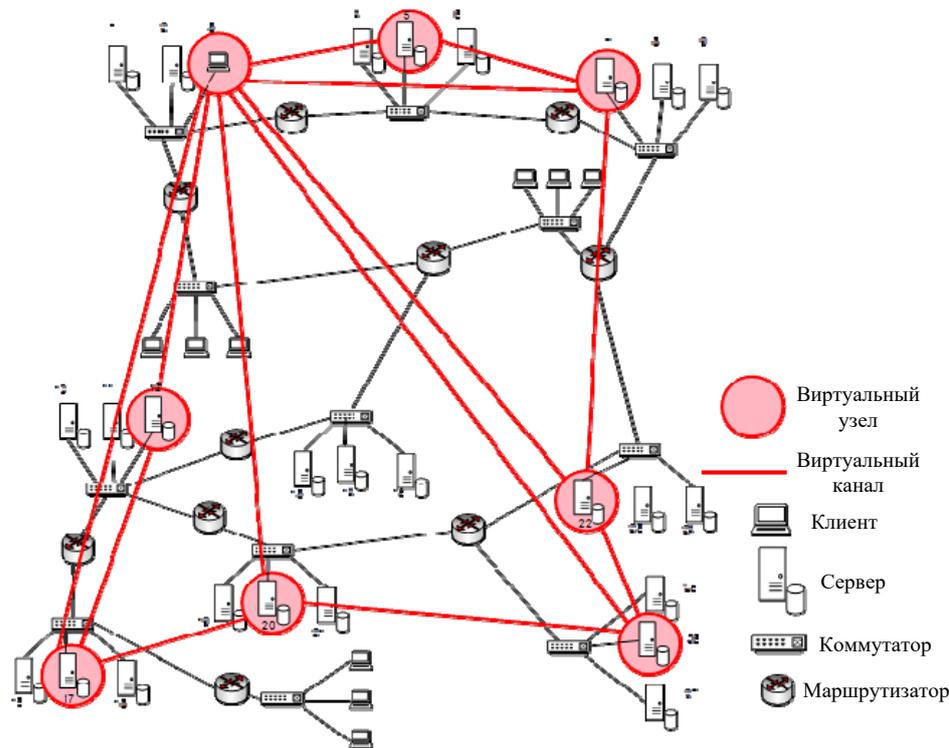


Рис. 3. Организация ОС РВС путем вложения мультиагентной системы в архитектуру глобальной вычислительной сети

В настоящей работе используются логические, или бинарные, сети Петри, эквивалентные по графическому представлению безопасным сетям Петри [28–31]. Такие сети использовались в работе [32] для описания интерфейса передачи сообщений в сетях, а в работе [33] – для описания работы мобильных агентов в метакomпьютерной среде для управления распределенной базой данных.

Возможна организация различных алгоритмов взаимодействий клиентов с серверами, при реализации которых учитываются различные критерии поиска информации, блокировки и разблокировки серверов. Особенностью большинства работ по проектированию РВС является использование в основном содержательных описаний моделей функционирования и рутинного программирования на основе практического опыта разработчиков.

Реконфигурируемые поведенческие исполнимые модели при их программной реализации позволяют оперативно изменять режим работы распределенных вычислительных систем. Для данных систем это имеет первостепенное значение, так как клиенту предоставляется возможность изменения режима функционирования «заказанной» архитектуры в соответствии с изменяющимися условиями решения задач. В целях иллюстрации возможностей использования реконфигурируемых исполнимых моделей предлагаются для

рассмотрения две схемы (схема 1 и схема 2) клиент-серверных взаимодействий при выполнении запросов клиентов. Согласно технологиям FaaS и AaaS функции и агенты, как и сообщения, также могут перемещаться между узлами в соответствии с требованиями пользователя.

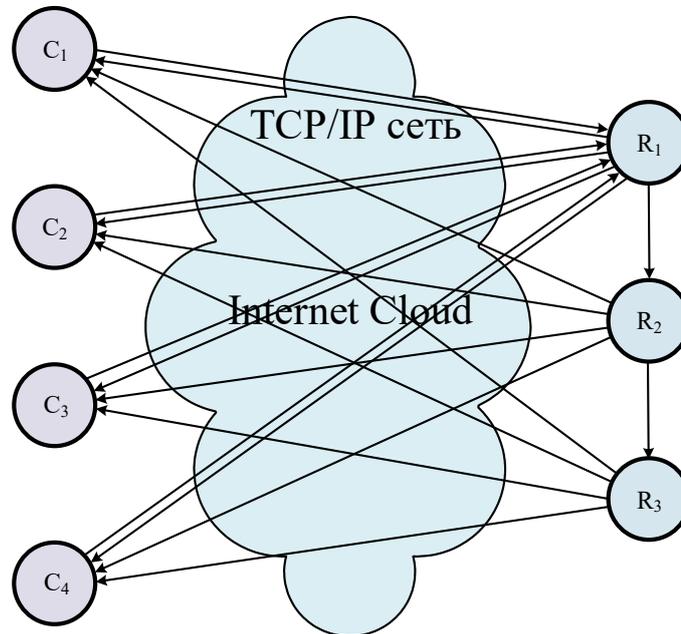


Рис. 4. Концептуальная модель взаимодействий в многосерверной системе «агент–клиент–сервер»

При работе по схеме 1 клиент  $C$  пытается отыскать свободный сервер из серверов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ . Для этого он посылает сообщение, последовательно обходящее серверы. Если будет найден свободный сервер, то этот сервер посылает ответ клиенту. Данное сообщение будет циркулировать в сети Internet Cloud, переходя от одного сервера к другому до тех пор, пока не будет найден свободный сервер. Дальнейшее описание целесообразно проиллюстрировать моделью, построенной на основе модификации безопасной сети Петри с дополнительными ингибиторными и информационными дугами и внедренными в ЛАОВ формализованными сетевыми примитивами, соответствующими передачам сообщений в компьютерной сети.

Поведенческая модель  $M_1(C, R_1, R_2, R_3)$  взаимодействий по схеме 1 в системе «клиент–серверы» для одного клиента и трех серверов представлена на рис. 5. Здесь модель клиентского приложения  $C$  представлена фрагментом бинарной сети Петри, содержащим позиции  $a_1, a_2, a_3, a_{10}$  и переходы  $at_1, at_2, at_3$ . Переход  $at_1$  в модели выполняет функцию передачи сообщения, которое самостоятельно отыскивает свободный сервер. Серверные приложения на рис. 5 представлены следующими позициями и переходами: сервер  $R_1$  представлен в модели позициями  $a_4, a_7, r_1$  и переходами  $at_4, at_7, at_8$ , причем позиция  $r_1$  характеризует состояние ресурса  $R_1$ : незанятость ресурса при наличии метки в позиции  $r_1$  ( $M(r_1) = \text{true}$ ) и его занятость, т.е. недоступность клиенту, при отсутствии метки в позиции  $r_1$  ( $M(r_1) = \text{false}$ ). Здесь  $M$  – унарный предик-

кат текущей маркировки позиции  $r_1$ . Аналогично, сервер  $R_2$  представлен в модели позициями  $a_5, a_8, r_2$  и переходами  $at_5, at_9, at_{10}$ , а сервер  $R_3$  представлен в модели позициями  $a_6, a_9, r_3$  и переходами  $at_6, at_{11}, at_{12}$ .

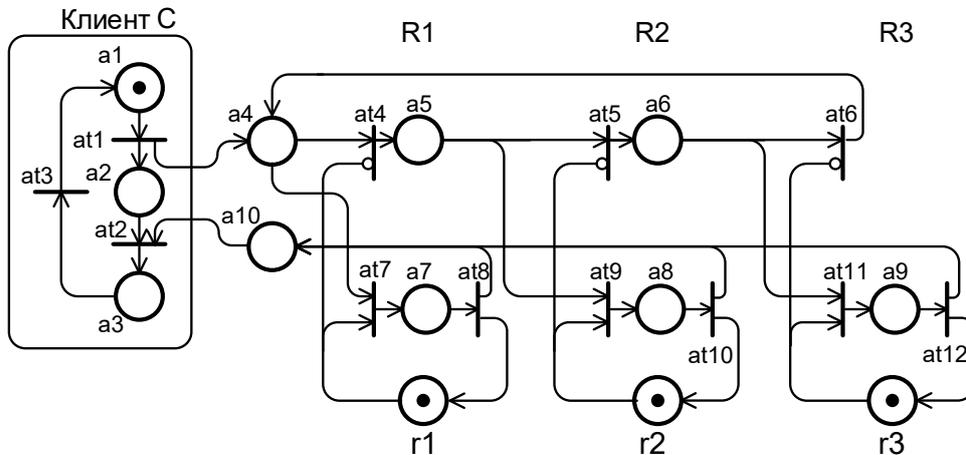


Рис. 5. Поведенческая модель  $M1(C, R1, R2, R3)$  взаимодействий в системе «клиент–серверы»

Позиции и переходы в бинарной сети Петри связаны простыми и ингибиторными дугами. Простая дуга разрешает срабатывание перехода, когда в его входной позиции есть метка, а ингибиторная дуга (стрелка с кружком на конце), наоборот, при наличии метки во входной позиции запрещает срабатывание перехода.

Система  $\Sigma_1$  логико-алгебраических операционных выражений (ЛАОВ) для сети, представленной на рис. 5, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 At_1 &= [P(a_1)](\{P(a_1) \leftarrow \text{false}, P(a_2) \leftarrow \text{true}, P(a_4) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_2 &= [P(a_2) \& P(a_{10})](\{P(a_2) \leftarrow \text{false}, P(a_{10}) \leftarrow \text{false}, P(a_3) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_3 &= [P(a_3)](\{P(a_3) \leftarrow \text{false}, P(a_1) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_4 &= [P(a_4) \& \neg P(r_1)](\{P(a_4) \leftarrow \text{false}, P(a_5) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_5 &= [P(a_5) \& \neg P(r_2)](\{P(a_5) \leftarrow \text{false}, P(a_6) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_6 &= [P(a_6) \& \neg P(r_3)](\{P(a_6) \leftarrow \text{false}, P(a_4) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_7 &= [P(a_4) \& P(r_1)](\{P(a_4) \leftarrow \text{false}, P(r_1) \leftarrow \text{false}, P(a_7) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_8 &= [P(a_7)](\{P(a_7) \leftarrow \text{false}, P(r_1) \leftarrow \text{true}, P(a_{10}) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_9 &= [P(a_5) \& P(r_2)](\{P(a_5) \leftarrow \text{false}, P(r_2) \leftarrow \text{false}, P(a_8) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_{10} &= [P(a_8)](\{P(a_8) \leftarrow \text{false}, P(r_2) \leftarrow \text{true}, P(a_{10}) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_{11} &= [P(a_6) \& P(r_3)](\{P(a_6) \leftarrow \text{false}, P(r_3) \leftarrow \text{false}, P(a_9) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_{12} &= [P(a_9)](\{P(a_9) \leftarrow \text{false}, P(r_3) \leftarrow \text{true}, P(a_{10}) \leftarrow \text{true}\} \vee E).
 \end{aligned}$$

Здесь и далее используется унарный предикат, или функция разметки позиций,  $P: A \cup R \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$ , где  $A$  – множество «рабочих» позиций, а  $R$  – множество ресурсных позиций,  $A \cap R = \emptyset$ . Система  $\Sigma_1$  ЛАОВ содержит продукционные правила срабатывания переходов бинарной сети Петри, представленные для удобства программирования исполнимой модели в целях со-

здания реального сетевого приложения в виде альфа-дизъюнкций Глушкова: нотация  $[\alpha](B \vee D)$  означает, что в зависимости от истинности или ложности замкнутого (без свободных предметных переменных) логического выражения  $\alpha$  выполняются действия  $B$  или  $D$ . В фигурные скобки в выражениях для системы  $\Sigma_1$  заключены операции модификации предиката  $P$ . Символ  $E$  обозначает пустое действие при ложности условия в квадратных скобках.

При работе по *схеме 2* клиент так же, как и при работе по *схеме 1*, пытается отыскать свободный сервер из серверов  $R_1, R_2$  и  $R_3$ . Отличие заключается в том, что в случае, когда все серверы оказались заняты, сообщение возвращается к клиенту. Модифицированная поведенческая модель  $M_2(C, R_1, R_2, R_3)$ , описывающая работу системы по *схеме 2*, представлена на рис. 6. Продукционные правила срабатывания  $At_1^*, At_2^*$  и  $At_6^*$  для переходов  $t_1, t_2$  и  $t_6$  изменятся (здесь и в приведенной ниже системе ЛАОВ  $\Sigma_2$  измененные правила отмечены звездочками).

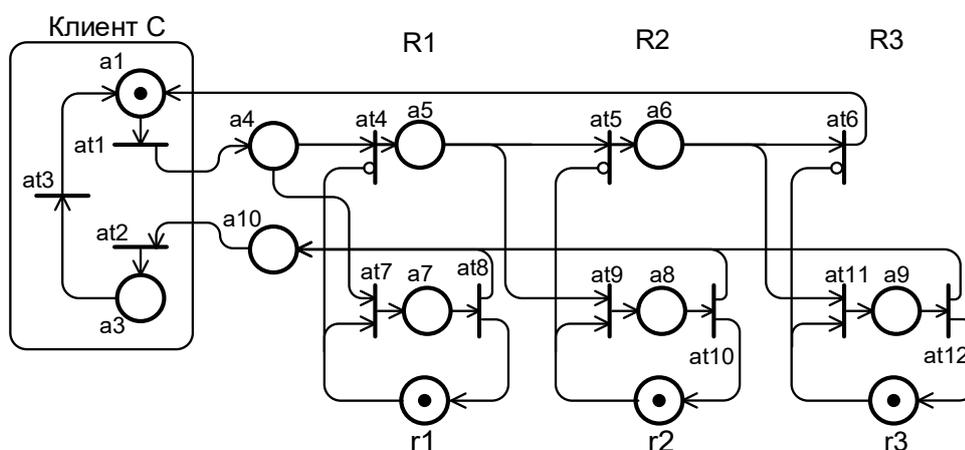


Рис. 6. Модифицированная поведенческая модель  $M_2(C, R_1, R_2, R_3)$  взаимодействий в системе «клиент–серверы»

Система  $\Sigma_2$  логико-алгебраических операционных выражений для сети  $M_2(C, R_1, R_2, R_3)$ , представленной на рис. 6, примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 At_1^* &= [P(a_1)](\{P(a_1) \leftarrow \mathbf{false}, P(a_4) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_2^* &= [P(a_{10})](\{P(a_{10}) \leftarrow \mathbf{false}, P(a_3) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_3 &= [P(a_3)](\{P(a_3) \leftarrow \mathbf{false}, P(a_1) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_4 &= [P(a_4) \& \neg P(r_1)](\{P(a_4) \leftarrow \mathbf{false}, P(a_5) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_5 &= [P(a_5) \& \neg P(r_2)](\{P(a_5) \leftarrow \mathbf{false}, P(a_6) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_6^* &= [P(a_6) \& \neg P(r_3)](\{P(a_6) \leftarrow \mathbf{false}, P(a_1) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_7 &= [P(a_4) \& P(r_1)](\{P(a_4) \leftarrow \mathbf{false}, P(r_1) \leftarrow \mathbf{false}, P(a_7) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_8 &= [P(a_7)](\{P(a_7) \leftarrow \mathbf{false}, P(r_1) \leftarrow \mathbf{true}, P(a_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_9 &= [P(a_5) \& P(r_2)](\{P(a_5) \leftarrow \mathbf{false}, P(r_2) \leftarrow \mathbf{false}, P(a_8) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_{10} &= [P(a_8)](\{P(a_8) \leftarrow \mathbf{false}, P(r_2) \leftarrow \mathbf{true}, P(a_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_{11} &= [P(a_6) \& P(r_3)](\{P(a_6) \leftarrow \mathbf{false}, P(r_3) \leftarrow \mathbf{false}, P(a_9) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 At_{12} &= [P(a_9)](\{P(a_9) \leftarrow \mathbf{false}, P(r_3) \leftarrow \mathbf{true}, P(a_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E).
 \end{aligned}$$

Объединяя две системы  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$ , получим следующую систему выражений для новой системы ЛАОВ  $\Sigma_{2-3}$ :

$$\begin{aligned}
 At_1 &= [\neg S(z) \ \& \ P(a_1)](\{P(a_1) \leftarrow \text{false}, P(a_2) \leftarrow \text{true}, P(a_4) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_1^* &= [S(z) \ \& \ P(a_1)](\{P(a_1) \leftarrow \text{false}, P(a_4) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_2 &= [\neg S(z) \ \& \ P(a_2) \ \& \ P(a_{10})](\{P(a_2) \leftarrow \text{false}, P(a_{10}) \leftarrow \text{false}, \\
 & P(a_3) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_2^* &= [\neg S(z) \ \& \ P(a_{10})](\{P(a_{10}) \leftarrow \text{false}, P(a_3) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_3 &= [P(a_3)](\{P(a_3) \leftarrow \text{false}, P(a_1) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_4 &= [P(a_4) \ \& \ \neg P(r_1)](\{P(a_4) \leftarrow \text{false}, P(a_5) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_5 &= [P(a_5) \ \& \ \neg P(r_2)](\{P(a_5) \leftarrow \text{false}, P(a_6) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_6 &= [\neg S(z) \ \& \ P(a_6) \ \& \ \neg P(r_3)](\{P(a_6) \leftarrow \text{false}, \\
 & P(a_4) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_6^* &= [S(z) \ \& \ P(a_6) \ \& \ \neg P(r_3)](\{P(a_6) \leftarrow \text{false}, \\
 & P(a_1) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_7 &= [P(a_4) \ \& \ P(r_1)](\{P(a_4) \leftarrow \text{false}, P(r_1) \leftarrow \text{false}, P(a_7) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_8 &= [P(a_7)](\{P(a_7) \leftarrow \text{false}, P(r_1) \leftarrow \text{true}, P(a_{10}) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_9 &= [P(a_5) \ \& \ P(r_2)](\{P(a_5) \leftarrow \text{false}, P(r_2) \leftarrow \text{false}, P(a_8) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_{10} &= [P(a_8)](\{P(a_8) \leftarrow \text{false}, P(r_2) \leftarrow \text{true}, P(a_{10}) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_{11} &= [P(a_6) \ \& \ P(r_3)](\{P(a_6) \leftarrow \text{false}, P(r_3) \leftarrow \text{false}, P(a_9) \leftarrow \text{true}\} \vee E); \\
 At_{12} &= [P(a_9)](\{P(a_9) \leftarrow \text{false}, P(r_3) \leftarrow \text{true}, P(a_{10}) \leftarrow \text{true}\} \vee E).
 \end{aligned}$$

Для настройки системы на работу по *схеме 1* или по *схеме 2* введен предикат  $S$  и предметная константа  $z$ . При ложности высказывания  $S(z)$  система настраивается на работу по *схеме 1*, а при его истинности – по *схеме 2*.

### 3. Логико-алгебраические спецификации с формализованными расширениями для представления передач сообщений и агентов в облачно-сетевых вычислительных системах

Приведенные ранее модели  $M_1(C, R_1, R_2, R_3)$  и  $M_2(C, R_1, R_2, R_3)$  являются неполными в том плане, что в них не учтены сетевые обмены, протекающие в среде вычислительной сети Internet Cloud. Поэтому целесообразно рассмотреть полные модели, в которых учитываются сетевые взаимодействия между клиентами и серверами. На рис. 7 представлена полная сетевая модель  $M_3(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$ , описывающая доступ четырех клиентов  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_4$  к трем серверам  $R_1, R_2$  и  $R_3$  по *схеме 1*, а на рис. 8 представлена полная сетевая модель  $M_4(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$ , описывающая доступ такого же числа клиентов к серверам по *схеме 2*.

Сетевые модели, представленные на данных рисунках, имеют регулярную структуру и хорошо масштабируются, что упрощает программную интерпретацию моделей и последующую реализацию сетевых приложений.

Сетевые спецификации представлены логико-алгебраическими операционными выражениями, построенными на основе правил срабатывания переходов в бинарных сетях Петри. Вводятся унарные предикаты, одноименные клиентам и серверам:  $C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3$ . Эти предикаты представляют собой функции разметки позиций. В качестве значений предметных переменных используются предметные константы, имена которых совпадают с име-

нами позиций, используемых в моделях  $M_3(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$  и  $M_4(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$ .

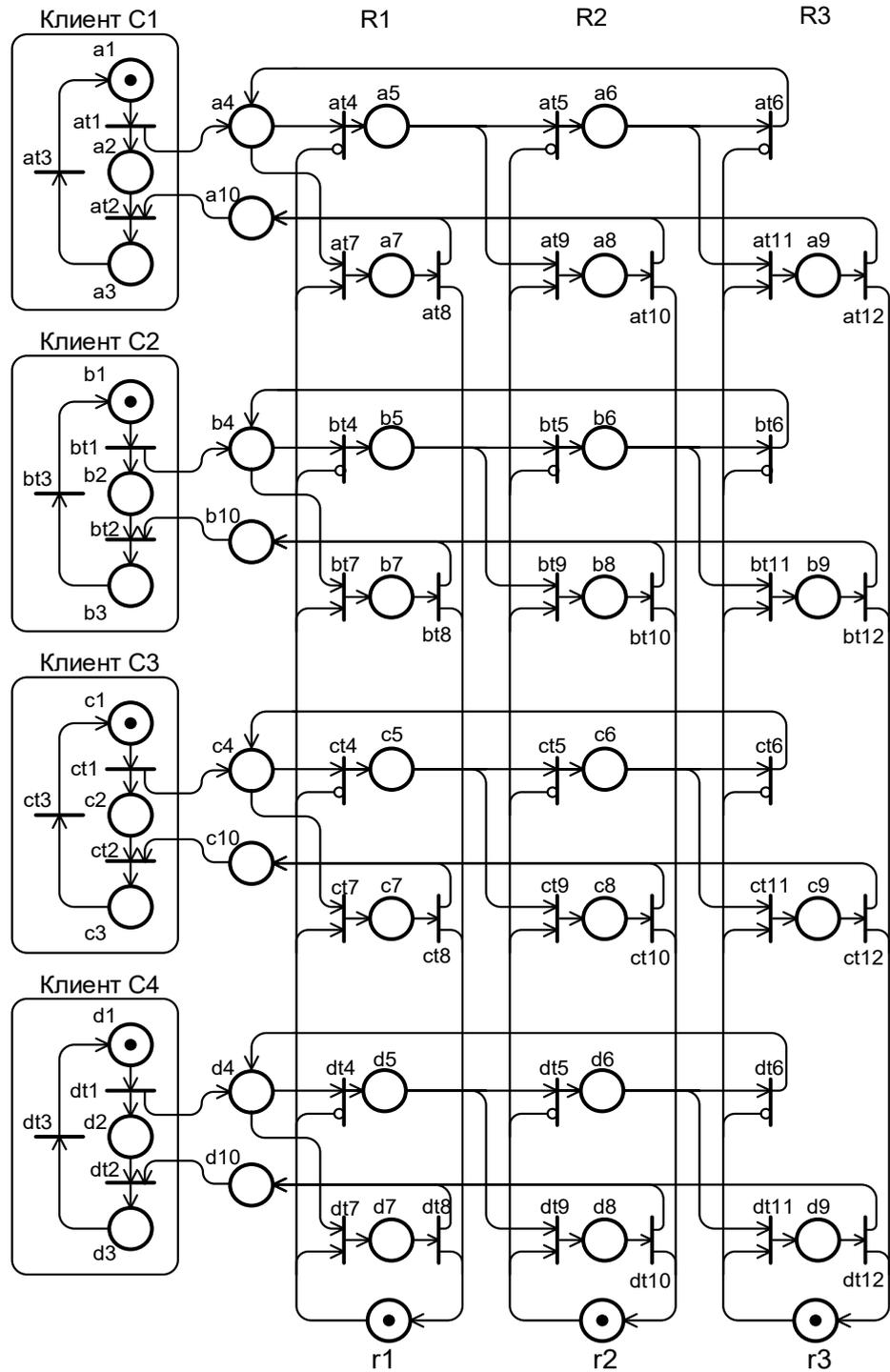


Рис. 7. Сетевая модель  $M_3(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$

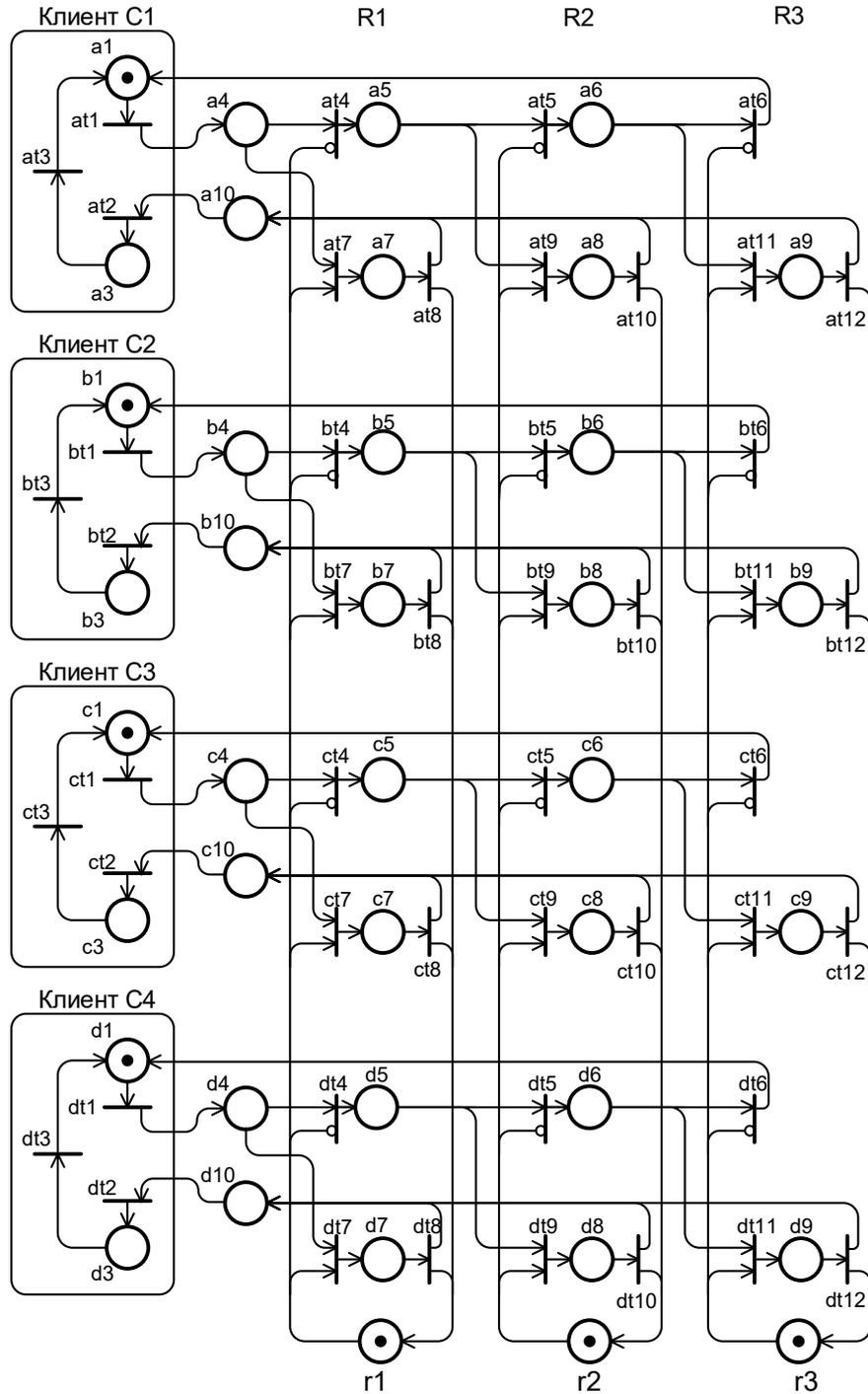


Рис. 8. Сетевая модель  $M_4(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$

Совмещенные сетевые формализованные спецификации  $\Sigma_{4 \times 3}$  для моделей, обеспечивающих использование приложений в составе четырех агенто-клиентов и ресурсов трех агенто-серверов, соответствующие как модели

$M_3(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$  при  $S(z) = \mathbf{false}$ , так и модели  $M_4(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$  при  $S(z) = \mathbf{true}$ , представлены в следующем виде:

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-клиентом  $C_1$ :

$At_1/C_1 = [\neg S(z) \ \& \ \mathit{Start} \ \& \ C_1(a_1)](\{\mathit{Send}(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{true},$

$C_1(a_1) \leftarrow \mathbf{false}, C_1(a_2) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E);$

$At_1^*/C_1 = [S(z) \ \& \ \mathit{Start} \ \& \ C_1(a_1)](\{\mathit{Send}(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{true},$

$C_1(a_1) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E);$

$At_2/C_1 = [\neg S(z) \ \& \ (\mathit{Send}(R_1, C_1, M_{R_1,C_1}) \vee \mathit{Send}(R_2, C_1, M_{R_2,C_1}) \vee \mathit{Send}(R_3, C_1, M_{R_3,C_1})) \ \& \ C_1(a_2) \ \& \ C_1(a_{10})](\{\mathit{Send}(R_1, C_1, M_{R_1,C_1}) \leftarrow \mathbf{false}, \mathit{Send}(R_2, C_1, M_{R_2,C_1}) \leftarrow \mathbf{false}, \mathit{Send}(R_3, C_1, M_{R_3,C_1}) \leftarrow \mathbf{false}, C_1(a_2) \leftarrow \mathbf{false}, C_1(a_{10}) \leftarrow \mathbf{false}, C_1(a_3) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E);$

$At_2^*/C_1 = [S(z) \ \& \ (\mathit{Send}(R_1, C_1, M_{R_1,C_1}) \vee \mathit{Send}(R_2, C_1, M_{R_2,C_1}) \vee \mathit{Send}(R_3, C_1, M_{R_3,C_1})) \ \& \ C_1(a_{10})](\{\mathit{Send}(R_1, C_1, M_{R_1,C_1}) \leftarrow \mathbf{false}, \mathit{Send}(R_2, C_1, M_{R_2,C_1}) \leftarrow \mathbf{false}, \mathit{Send}(R_3, C_1, M_{R_3,C_1}) \leftarrow \mathbf{false}, C_1(a_{10}) \leftarrow \mathbf{false}, C_1(a_3) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E);$

$At_3/C_1 = [C_1(a_3)](\{C_1(a_3) \leftarrow \mathbf{false}, C_1(a_1) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee \mathit{Ret}_{\tau,n}(At_1/C_1));$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_1$  для приложения-клиента  $C_1$ :

$At_4/R_1 = [\mathit{Send}(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \ \& \ R_1(a_4) \ \& \ \neg R_1(r_1)]$

$(\{\mathit{Send}(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{false}, \mathit{Send}(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ R_2(a_5) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E);$

$At_7/R_1 = [\mathit{Send}(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \ \& \ R_1(a_4) \ \& \ R_1(r_1)]$

$(\{\mathit{Send}(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(a_7) \leftarrow \mathbf{true}, R_1(r_1) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E);$

$At_8/R_1 = [R_1(a_7)](\{R_1(a_7) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(r_1) \leftarrow \mathbf{true},$

$\mathit{Send}(R_1, C_1, M_{R_1,C_1}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ C_1(a_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E);$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_2$  для приложения-клиента  $C_1$ :

$At_5/R_2 = [\mathit{Send}(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \ \& \ R_2(a_5) \ \& \ \neg R_2(r_2)]$

$(\{\mathit{Send}(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(a_5) \leftarrow \mathbf{false}, \mathit{Send}(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ R_3(a_6) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E);$

$At_9/R_2 = [\mathit{Send}(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \ \& \ R_2(a_5) \ \& \ R_2(r_2)]$

$(\{\mathit{Send}(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(a_5) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(a_8) \leftarrow \mathbf{true}, R_2(r_2) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E);$

$At_{10}/R_2 = [R_2(a_8)](\{R_2(a_8) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(r_2) \leftarrow \mathbf{true},$

$\mathit{Send}(R_2, C_1, M_{R_2,C_1}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ C_1(a_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E);$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_3$  для приложения-клиента  $C_1$ :

$At_6/R_3 = [\neg S(z) \ \& \ \mathit{Send}(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \ \& \ R_3(a_6) \ \& \ \neg R_3(r_3)]$

$(\{\mathit{Send}(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(a_6) \leftarrow \mathbf{false}, \mathit{Send}(R_3, R_1, M_{R_3,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \ \#$

$R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{true} \} \vee E);$   
 $At_6^*/R_3 = [S(z) \& Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(a_6) \& \neg R_3(r_3)]$   
 $(\{Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(a_6) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_3, C_1, M_{R_3,C_1}) \leftarrow \mathbf{true} \#$   
 $C_1(a_1) \leftarrow \mathbf{true} \} \vee E);$   
 $At_{11}/R_3 = [Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(a_6) \& R_3(r_3)]$   
 $(\{Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(a_6) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(a_9) \leftarrow \mathbf{true},$   
 $R_3(r_3) \leftarrow \mathbf{false} \} \vee E);$   
 $At_{12}/R_3 = [R_3(a_9)](\{R_3(a_9) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(r_3) \leftarrow \mathbf{true},$   
 $Send(R_3, C_1, M_{R_3,C_1}) \leftarrow \mathbf{true} \# C_1(a_{10}) \leftarrow \mathbf{true} \} \vee E);$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-клиентом  $C_2$ :

$Bt_1/C_2 = [\neg S(z) \& Start \& C_2(b_1)](\{Send(C_2, R_1, M_{C_2,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \# R_1(b_4) \leftarrow$   
 $\mathbf{true},$   
 $C_2(b_1) \leftarrow \mathbf{false}, C_2(b_2) \leftarrow \mathbf{true} \} \vee E);$   
 $Bt_1^*/C_2 = [S(z) \& Start \& C_2(b_1)](\{Send(C_2, R_1, M_{C_2,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \# R_1(b_4) \leftarrow$   
 $\mathbf{true},$   
 $C_2(b_1) \leftarrow \mathbf{false} \} \vee E);$   
 $Bt_2/C_2 = [\neg S(z) \& (Send(R_1, C_2, M_{R_1,C_2}) \vee Send(R_2, C_2, M_{R_2,C_2}) \vee Send(R_3, C_2,$   
 $M_{R_3,C_2})) \& C_2(b_2) \& C_2(b_{10})](\{Send(R_1, C_2, M_{R_1,C_2}) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_2, C_2, M_{R_2,C_2}) \leftarrow$   
 $\mathbf{false},$   
 $Send(R_3, C_2, M_{R_3,C_2}) \leftarrow \mathbf{false}, C_2(b_2) \leftarrow \mathbf{false}, C_2(b_{10}) \leftarrow \mathbf{false}, C_2(b_3) \leftarrow$   
 $\mathbf{true} \} \vee E);$   
 $Bt_2^*/C_2 = [\neg S(z) \& (Send(R_1, C_2, M_{R_1,C_2}) \vee Send(R_2, C_2, M_{R_2,C_2}) \vee Send(R_3,$   
 $C_2, M_{R_3,C_2})) \& C_2(b_{10})](\{Send(R_1, C_2, M_{R_1,C_2}) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_2, C_2, M_{R_2,C_2}) \leftarrow \mathbf{false},$   
 $Send(R_3, C_2, M_{R_3,C_2}) \leftarrow \mathbf{false}, C_2(b_{10}) \leftarrow \mathbf{false}, C_2(b_3) \leftarrow \mathbf{true} \} \vee E);$   
 $Bt_3/C_2 = [C_2(b_3)](\{C_2(b_3) \leftarrow \mathbf{false}, C_2(b_1) \leftarrow \mathbf{true} \} \vee Ret_{\tau,n}(Bt_1/C_2));$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_1$  для приложения-клиента  $C_2$ :

$Bt_4/R_1 = [Send(C_2, R_1, M_{C_2,R_1}) \& R_1(b_4) \& \neg R_1(r_1)]$   
 $(\{Send(C_2, R_1, M_{C_2,R_1}) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(b_4) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{true} \#$   
 $R_2(b_5) \leftarrow \mathbf{true} \} \vee E);$   
 $Bt_7/R_1 = [Send(C_2, R_1, M_{C_2,R_1}) \& R_1(b_4) \& R_1(r_1)]$   
 $(\{Send(C_2, R_1, M_{C_2,R_1}) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(b_4) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(b_7) \leftarrow \mathbf{true},$   
 $R_1(r_1) \leftarrow \mathbf{false} \} \vee E);$   
 $Bt_8/R_1 = [R_1(b_7)](\{R_1(b_7) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(r_1) \leftarrow \mathbf{true},$   
 $Send(R_1, C_2, M_{R_1,C_2}) \leftarrow \mathbf{true} \# C_2(b_{10}) \leftarrow \mathbf{true} \} \vee E);$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_2$  для приложения-клиента  $C_2$ :

$Bt_5/R_2 = [Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \& R_2(b_5) \& \neg R_2(r_2)]$   
 $(\{Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(b_5) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{true} \#$   
 $R_3(b_6) \leftarrow \mathbf{true} \} \vee E);$   
 $Bt_6/R_2 = [Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \& R_2(b_5) \& R_2(r_2)]$   
 $(\{Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(b_5) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(b_8) \leftarrow \mathbf{true},$

$$R_2(r_2) \leftarrow \text{false} \} \vee E);$$

$$Bt_{10}/R_2 = [R_2(b_8)](\{R_2(b_8) \leftarrow \text{false}, R_2(r_2) \leftarrow \text{true},$$

$$\text{Send}(R_2, C_2, M_{R_2,C_2}) \leftarrow \text{true} \# C_2(b_{10}) \leftarrow \text{true} \} \vee E);$$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_3$  для приложения-клиента  $C_2$ :

$$Bt_6/R_3 = [\neg S(z) \& \text{Send}(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(b_6) \& \neg R_3(r_3)]$$

$$(\{ \text{Send}(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \text{false}, R_3(b_6) \leftarrow \text{false}, \text{Send}(R_3, R_1, M_{R_3,R_1}) \leftarrow \text{true} \#$$

$$R_1(b_4) \leftarrow \text{true} \} \vee E);$$

$$Bt_6^*/R_3 = [S(z) \& \text{Send}(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(b_6) \& \neg R_3(r_3)]$$

$$(\{ \text{Send}(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \text{false}, R_3(b_6) \leftarrow \text{false}, \text{Send}(R_3, C_2, M_{R_3,C_2}) \leftarrow \text{true} \#$$

$$C_2(b_1) \leftarrow \text{true} \} \vee E);$$

$$Bt_{11}/R_3 = [\text{Send}(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(b_6) \& R_3(r_3)]$$

$$(\{ \text{Send}(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \text{false}, R_3(b_6) \leftarrow \text{false}, R_3(b_9) \leftarrow \text{true},$$

$$R_3(r_3) \leftarrow \text{false} \} \vee E);$$

$$Bt_{12}/R_3 = [R_3(b_9)](\{R_3(b_9) \leftarrow \text{false}, R_3(r_3) \leftarrow \text{true},$$

$$\text{Send}(R_3, C_2, M_{R_3,C_2}) \leftarrow \text{true} \# C_2(b_{10}) \leftarrow \text{true} \} \vee E);$$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-клиентом  $C_3$ :

$$Ct_1/C_3 = [\neg S(z) \& \text{Start} \& C_3(c_1)](\{ \text{Send}(C_3, R_1, M_{C_3,R_1}) \leftarrow \text{true} \# R_1(c_4) \leftarrow$$

$$\text{true}, C_3(c_1) \leftarrow \text{false}, C_3(c_2) \leftarrow \text{true} \} \vee E);$$

$$Ct_1^*/C_3 = [S(z) \& \text{Start} \& C_3(c_1)](\{ \text{Send}(C_3, R_1, M_{C_3,R_1}) \leftarrow \text{true} \# R_1(c_4) \leftarrow$$

$$\text{true},$$

$$C_3(c_1) \leftarrow \text{false} \} \vee E);$$

$$Ct_2/C_3 = [\neg S(z) \& (\text{Send}(R_1, C_3, M_{R_1,C_3}) \vee \text{Send}(R_2, C_3, M_{R_2,C_3}) \vee \text{Send}(R_3, C_3,$$

$$M_{R_3,C_3})) \& C_3(c_{10})](\{ \text{Send}(R_1, C_3, M_{R_1,C_3}) \leftarrow \text{false}, \text{Send}(R_2, C_3, M_{R_2,C_3}) \leftarrow \text{false},$$

$$\text{Send}(R_3, C_3, M_{R_3,C_3}) \leftarrow \text{false}, C_3(c_{10}) \leftarrow \text{false}, C_3(c_2) \leftarrow \text{false}, C_3(c_3) \leftarrow$$

$$\text{true} \} \vee E);$$

$$Ct_2^*/C_3 = [S(z) \& (\text{Send}(R_1, C_3, M_{R_1,C_3}) \vee \text{Send}(R_2, C_3, M_{R_2,C_3}) \vee \text{Send}(R_3, C_3,$$

$$M_{R_3,C_3})) \& C_3(c_{10})](\{ \text{Send}(R_1, C_3, M_{R_1,C_3}) \leftarrow \text{false}, \text{Send}(R_2, C_3, M_{R_2,C_3}) \leftarrow \text{false},$$

$$\text{Send}(R_3, C_3, M_{R_3,C_3}) \leftarrow \text{false}, C_3(c_{10}) \leftarrow \text{false}, C_3(c_3) \leftarrow \text{true} \} \vee E);$$

$$Ct_3/C_3 = [C_3(c_3)](\{ C_3(c_3) \leftarrow \text{false}, C_3(c_1) \leftarrow \text{true} \} \vee \text{Ret}_{\tau,n}(Ct_1/C_3));$$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_1$  для приложения-клиента  $C_3$ :

$$Ct_4/R_1 = [\text{Send}(C_3, R_1, M_{C_3,R_1}) \& R_1(c_4) \& \neg R_1(r_1)]$$

$$(\{ \text{Send}(C_3, R_1, M_{C_3,R_1}) \leftarrow \text{false}, R_1(c_4) \leftarrow \text{false}, \text{Send}(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \text{true} \#$$

$$R_2(c_5) \leftarrow \text{true} \} \vee E);$$

$$Ct_7/R_1 = [\text{Send}(C_3, R_1, M_{C_3,R_1}) \& R_1(c_4) \& R_1(r_1)]$$

$$(\{ \text{Send}(C_3, R_1, M_{C_3,R_1}) \leftarrow \text{false}, R_1(c_4) \leftarrow \text{false}, R_1(c_7) \leftarrow \text{true},$$

$$R_1(r_1) \leftarrow \text{false} \} \vee E);$$

$$Ct_8/R_1 = [R_1(c_7)](\{ R_1(c_7) \leftarrow \text{false}, R_1(r_1) \leftarrow \text{true},$$

$$\text{Send}(R_1, C_3, M_{R_1,C_3}) \leftarrow \text{true} \# C_3(c_{10}) \leftarrow \text{true} \} \vee E);$$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_2$  для приложения-клиента  $C_3$ :

$$\begin{aligned}
 Ct_5/R_2 &= [Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \& R_2(c_5) \& \neg R_2(r_2)] \\
 (\{Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(c_5) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{true} \# \\
 R_3(c_6) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 Ct_9/R_2 &= [Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \& R_2(c_5) \& R_2(r_2)] \\
 (\{Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(c_5) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(c_8) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 R_2(r_2) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E); \\
 Ct_{10}/R_2 &= [R_2(c_8)](\{R_2(c_8) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(r_2) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 Send(R_2, C_3, M_{R_2,C_3}) \leftarrow \mathbf{true} \# C_3(c_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E);
 \end{aligned}$$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_3$  для приложения-клиента  $C_3$ :

$$\begin{aligned}
 Ct_6/R_3 &= [\neg S(z) \& Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(c_6) \& \neg R_3(r_3)] \\
 (\{Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(c_6) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_3, R_1, M_{R_3,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \# \\
 R_1(c_4) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 Ct_6^*/R_3 &= [S(z) \& Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(c_6) \& \neg R_3(r_3)] \\
 (\{Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(c_6) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_3, C_3, M_{R_3,C_3}) \leftarrow \mathbf{true} \# \\
 C_3(c_1) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 Ct_{11}/R_3 &= [Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(c_6) \& R_3(r_3)] \\
 (\{Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(c_6) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(c_9) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 R_3(r_3) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E); \\
 Ct_{12}/R_3 &= [R_3(c_9)](\{R_3(c_9) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(r_3) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 Send(R_3, C_3, M_{R_3,C_3}) \leftarrow \mathbf{true} \# C_3(c_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E);
 \end{aligned}$$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-клиентом  $C_4$ :

$$\begin{aligned}
 Dt_1/C_4 &= [\neg S(z) \& Start \& C_4(d_1)](\{Send(C_4, R_1, M_{C_4,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \# R_1(d_4) \leftarrow \\
 \mathbf{true}, C_4(d_2) \leftarrow \mathbf{true}, C_4(d_1) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E); \\
 Dt_1^*/C_4 &= [S(z) \& Start \& C_4(d_1)](\{Send(C_4, R_1, M_{C_4,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \# R_1(d_4) \leftarrow \\
 \mathbf{true}, C_4(d_1) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E); \\
 Dt_2/C_4 &= [(Send(R_1, C_4, M_{R_1,C_4}) \vee Send(R_2, C_4, M_{R_2,C_4}) \vee Send(R_3, C_4, M_{R_3,C_4})) \\
 \& C_4(d_{10})](\{Send(R_1, C_4, M_{R_1,C_4}) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_2, C_4, M_{R_2,C_4}) \leftarrow \mathbf{false}, \\
 Send(R_3, C_4, M_{R_3,C_4}) \leftarrow \mathbf{false}, C_4(d_{10}) \leftarrow \mathbf{false}, C_4(d_3) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 Dt_3/C_4 &= [C_4(d_3)](\{C_4(d_3) \leftarrow \mathbf{false}, C_4(d_1) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee Ret_{\tau,n}(Dt_1/C_4));
 \end{aligned}$$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_1$  для приложения-клиента  $C_4$ :

$$\begin{aligned}
 Dt_4/R_1 &= [Send(C_4, R_1, M_{C_4,R_1}) \& R_1(d_4) \& \neg R_1(r_1)] \\
 (\{Send(C_4, R_1, M_{C_4,R_1}) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(d_4) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{true} \# \\
 R_2(d_5) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 Dt_7/R_1 &= [Send(C_4, R_1, M_{C_4,R_1}) \& R_1(d_4) \& R_1(r_1)] \\
 (\{Send(C_4, R_1, M_{C_4,R_1}) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(d_4) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(d_7) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 R_1(r_1) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E); \\
 Dt_8/R_1 &= [R_1(d_7)](\{R_1(d_7) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(r_1) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 Send(R_1, C_4, M_{R_1,C_4}) \leftarrow \mathbf{true} \# C_4(d_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee Ret_{\tau,n}(Dt_4/R_1));
 \end{aligned}$$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_2$  для приложения-клиента  $C_4$ :

$$\begin{aligned}
 Dt_5/R_2 &= [Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \& R_2(d_5) \& \neg R_2(r_2)] \\
 (\{Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(d_5) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{true} \# \\
 R_3(d_6) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 Dt_9/R_2 &= [Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \& R_2(d_5) \& R_2(r_2)] \\
 (\{Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(d_5) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(d_8) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 R_2(r_2) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E); \\
 Dt_{10}/R_2 &= [R_2(d_8)](\{R_2(d_8) \leftarrow \mathbf{false}, R_2(r_2) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 Send(R_2, C_4, M_{R_2,C_4}) \leftarrow \mathbf{true} \# C_4(d_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee Ret_{\tau,n}(At_5/R_2));
 \end{aligned}$$

– сетевые спецификации для модулей, реализуемых приложением-сервером  $R_3$  для приложения-клиента  $C_4$ :

$$\begin{aligned}
 Dt_6/R_3 &= [\neg S(z) \& Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(d_6) \& \neg R_3(r_3)] \\
 (\{Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(d_6) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_3, R_1, M_{R_3,R_1}) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 R_1(d_4) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 Dt_6^*/R_3 &= [S(z) \& Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(d_6) \& \neg R_3(r_3)] \\
 (\{Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(d_6) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_3, C_4, M_{R_3,C_4}) \leftarrow \mathbf{true} \# \\
 C_4(d_1) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E); \\
 Dt_{11}/R_3 &= [Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \& R_3(d_6) \& R_3(r_3)] \\
 (\{Send(R_2, R_3, M_{R_2,R_3}) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(d_6) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(d_9) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 R_3(r_3) \leftarrow \mathbf{false}\} \vee E); \\
 Dt_{12}/R_3 &= [R_3(d_9)](\{R_3(d_9) \leftarrow \mathbf{false}, R_3(r_3) \leftarrow \mathbf{true}, \\
 Send(R_3, C_4, M_{R_3,C_4}) \leftarrow \mathbf{true} \# C_4(d_{10}) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee Ret_{\tau,n}(At_6/R_3)).
 \end{aligned}$$

#### 4. Методика отображения логико-алгебраических операционных выражений на архитектуру ОС PBC типа FaaS и AaaS

Приведенные выше выражения описывают в логико-алгебраической форме срабатывания переходов в бинарных сетях Петри, представленных на рис. 7 и 8. Построенные модели относятся к классу исполнимых, поскольку на их основе возможно построить прототипное программное обеспечение для компьютерной сети, реализующей функции ОС PBC типа FaaS или AaaS. Для облегчения этого построения в выражениях используются правила обновления тернарных предикатов вида  $Send(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{true}$  и  $Send(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{false}$ . Первое из этих правил соответствует в сетевом приложении команде отправки сообщения  $M_{C_1,R_1}$  из узла  $C_1$ , а второе – состоявшемуся приему этого сообщения узлом  $R_1$ .

**Методика отображения** логико-алгебраических операционных выражений на архитектуру ОС PBC типа FaaS или AaaS состоит в формировании логико-алгебраических операционных выражений по модульному принципу, распределении модулей по серверам. В связи с регулярностью моделей  $M_3(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$  и  $M_4(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$  это распределение выполняется естественным образом.

Клиентские ( $C_1, C_2, C_3, C_4$ ) и серверные ( $R_1, R_2, R_3$ ) агентно-ориентированные приложения реализуются в виде сетевых программных модулей на основе логико-алгебраических операционных выражений. Например, клиентское приложение  $C_1$  включает модули – программные реализации выражений  $At_1/C_1, At_1^*/C_1, At_2/C_1, At_2^*/C_1$  и  $At_3/C_1$ , а серверное приложение  $R_3$  – модули  $At_6/R_3, At_6^*/R_3, At_{11}/R_3, At_{12}/R_3, Bt_6/R_3, Bt_6^*/R_3, Bt_{11}/R_3, Bt_{12}/R_3, Ct_6/R_3,$

$Ct_6^*/R_3, Ct_{11}/R_3, Ct_{12}/R_3, Dt_6/R_3, Dt_6^*/R_3, Dt_{11}/R_3, Dt_{12}/R_3$ . Звездочками здесь отмечены альтернативно исполняемые выражения системы  $\Sigma_{4 \times 3}$  для реконфигурируемой модели, построенной на основе совмещения моделей  $M_3(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$  и  $M_4(C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3)$ .

В отличие от предыдущих упрощенных моделей  $M_1(C, R_1, R_2, R_3)$  и  $M_2(C, R_1, R_2, R_3)$ , при построении последней логико-алгебраической модели  $\Sigma_{4 \times 3}$  на формальном уровне учтены особенности объекта моделирования при работе в сети Internet Cloud. При описании модели и сетевого приложения будут, как это часто принято для сокращения описания, смешиваться понятия об объектах модели и объектах предметной области. Проанализируем некоторые основные моменты построения формализованных спецификаций на примере следующего выражения  $At_1/C_1$  для перехода  $at_1$ :

$$At_1/C_1 = [\neg S(z) \ \& \ Start \ \& \ C_1(a_1)](\{Send(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{true}, C_1(a_1) \leftarrow \mathbf{false}, C_1(a_2) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E).$$

Имя  $At_1/C_1$  означает, что процедура  $At_1/C_1$  перехода  $at_1$  в виде программного модуля реализуется на компьютере клиента  $C_1$ . Модуль начинает выполнение с проверки истинности составного высказывания  $\neg S(z) \ \& \ Start \ \& \ C_1(a_1)$ , где  $S(z)$  – предикат настройки модуля на заданный режим работы по *схеме 1* или *схеме 2*,  $Start$  – стартовое условие для модуля,  $C_1(a_1)$  – условие готовности клиента к выдаче сообщения. Если указанное условие истинно, то далее выполняется следующая последовательность действий:  $Send(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{true}$ .

Обновлению тернарного предиката  $Send(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{true}$  соответствует отправка сообщения  $M_{C_1,R_1}$  от приложения клиента  $C_1$  приложению сервера  $R_1$ . Обновлению унарного предиката разметки  $R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{true}$  соответствует факт приема сообщения  $M_{C_1,R_1}$  приложением сервера  $R_1$ . Символ “#” означает, что два действия причинно связаны и выполняются последовательно. Выполнение правила  $C_1(a_2) \leftarrow \mathbf{true}$  соответствует переходу приложения клиента в состояние ожидания ответного сообщения от одного из серверов. Логико-алгебраическое выражение

$$At_4/R_1 = [Send(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \ \& \ R_1(a_4) \ \& \ \neg R_1(r_1)](\{Send(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{false}, R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{false}, Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ R_2(a_5) \leftarrow \mathbf{true}\} \vee E)$$

реализуется программным модулем приложения сервера  $R_1$ . Этот модуль принимает сообщение  $M_{C_1,R_1}$ . О наличии этого сообщения в модели сервера  $R_1$  свидетельствует истинность составного высказывания  $Send(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \ \& \ R_1(a_4)$ . Сервер  $R_1$  недоступен при ложности высказывания  $R_1(r_1)$ . Поэтому в модели сервер  $R_1$  аннулирует сообщение путем обновления предикатов  $Send(C_1, R_1, M_{C_1,R_1}) \leftarrow \mathbf{false}$  и  $R_1(a_4) \leftarrow \mathbf{false}$  и далее посылает сообщение  $M_{R_1,R_2}$  следующему серверу  $R_2$ . В модели серверного приложения этот факт отмечается последовательным выполнением следующих действий:  $Send(R_1, R_2, M_{R_1,R_2}) \leftarrow \mathbf{true} \ \# \ R_2(a_5) \leftarrow \mathbf{true}$ .

Остальные выражения составлены по такому же принципу. В некоторых выражениях применяются операторы вида  $Ret_{\tau,n}$ , используемые для передачи управления конкретному модулю. Например, после выполнения выражения

$$At_3/C_1 = [C_1(a_3)](\{C_1(a_3) \leftarrow \text{false}, C_1(a_1) \leftarrow \text{true}\} \vee Ret_{\tau,n}(At_1/C_1))$$

и при  $C_1(a_3) = \text{false}$  выполняется оператор  $Ret_{\tau,n}(At_1/C_1)$ , передающий управление модулю  $At_1/C_1$  после обработки тайм-аута  $\tau$ , но не более  $n$  раз.

### Заключение

Предложена организация функционирования облачно-сетевых 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). Предложена формализация функциональной архитектуры ОС РВС системами логико-алгебраических операционных выражений, относящихся к классу исполнимых моделей и пригодных для непосредственной программной реализации в сетевой компьютерной среде; дополнительным свойством ЛАОВ является возможность реконфигурации (модификации режима функционирования) результирующего сетевого программного обеспечения. Предложена методика отображения системы логико-алгебраических операционных выражений на архитектуру компьютерной сети, учитывающая регулярный характер модели.

Методика синтеза облачных систем с новой архитектурой AaaS, основанная на формализованных логико-алгебраических спецификациях, позволяет ускорить создание программного обеспечения для сервис-ориентированных распределенных вычислительных систем и расширить их функциональные возможности.

В качестве направления дальнейших исследований предлагается развивать методы абстрактного и структурного синтеза облачно-сетевых сервис-ориентированных распределенных вычислительных систем и поддерживающих их агентских платформ на основе формализованных спецификаций и автоматической генерации сетевого программного обеспечения промежуточного уровня (*middleware level*).

### Библиографический список

1. Apache CloudStack: Open Source Infrastructure as a Service Cloud Computing Platform / R. Kumar, K. Jain, H. Maharwal, N. Jain, A. Dadhich // International Journal of advancement in Engineering technology, Management and Applied Science (IJAET-MAS). – 2014. – Vol. 1, № 2. – P. 111–116.
2. **Kumar, R.** Comparison between Cloud Computing, Grid Computing, Cluster Computing and Virtualization / R. Kumar // International Journal of Modern Computer Science and Applications (IJMCSA). – 2015. – Vol. 3, № 1. – P. 42–47.
3. **Tanenbaum, A. S.** Distributed Systems: principles and paradigms / A. S. Tanenbaum, Maarten van Steen. – 2nd Edition. – Pearson Education, Inc., 2007. – 669 p.
4. FIPA Specifications. – URL: <http://www.fipa.org/specifications/index.html>, свободный (дата обращения: 12.11.2019).
5. A Survey of Programming Languages and Platforms for Multi-Agent Systems / R. H. Bordini et al. // Informatica. – 2006. – Vol. 30. – P. 33–44.
6. **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.
7. **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>.

8. **Bellifemine, F. L.** Developing multi-agent systems with JADE / F. L. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood. – Wiley, 2007. – 300 p.
9. Java Agent Development Environment (JADE). – URL: <http://jade.tilab.com/>, свободный (дата обращения: 12.11.2019).
10. Development of Mobile Agents with Aglets (A Java Based Tool) / M. Yadav, P. Sethi, D. Juneja, N. Chauhan // Int. Journal of Innovations & Advancement in Computer Science. – 2015. – Vol. 4, Special Issue. – P. 245–251.
11. **Evripidou, P.** Metacomputing with Mobile Agents / P. Evripidou, G. Samaras // Int. Journal of Parallel Programming. – 2006. – Vol. 34, № 5. – P. 429–458.
12. **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.
13. **Samaras, G.** Extendible, Mobile-Agent Based Services for the Materialization and Maintenance of Personalized and Shareable Web Views ViSMA / G. Samaras, K. Karenos, P. K. Chrysanthis, E. Pitoura // In Proc. 11th DEXA Int. Workshop on Mobility in Databases and Distributed Systems, 2003. – P. 974–979.
14. **Kausar, Md. Abu** 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.
15. **Dada, E. G.** Performance Evaluation of AGLETS and JADE Mobile Agent Using Encryption and Decryption Time / E. G. Dada, S. B. Joseph, M. K. Mishra // Radioelectronics&Informatics. – 2010. – № 4. – P. 16–20.
16. **Lange, D.** Programming and deploying Java mobile agents with aglets / D. Lange, M. Oshima. – Addison : Wesley Professional, 1998. – 256 p.
17. **Стельмах, С.** Шесть ключевых преимуществ бессерверной архитектуры / С. Стельмах. – URL: <https://www.itweek.ru/its/article/detail.php?ID=208802>;, свободный (дата обращения: 12.11.2019).
18. FaaS (Function-as-a-Service) / Материал из Национальной библиотеки им. Н. Э. Баумана. – URL: [https://ru.bmstu.wiki/FaaS\\_\(Function-as-a-Service\)](https://ru.bmstu.wiki/FaaS_(Function-as-a-Service)), свободный (дата обращения: 12.11.2019).
19. **Krol, M.** NFaaS: Named Function as a Service / M. Krol, I. Psaras // In Proceedings of ICN '17 (Berlin, Germany, September 26–28, 2017). – Berlin, 2017. – 11 p.
20. **Ellis, A.** Introducing Functions as a Service – OpenFaaS / A. Ellis. Оpubл. 08.08.2017. – URL: <https://blog.alexellis.io/introducing-functions-as-a-service/>, свободный (дата обращения: 12.11.2019).
21. **Haines, S.** Serverless computing with AWS Lambda, 2018 / S. Haines. – URL: <https://www.javaworld.com/article/3210726/serverless-computing-with-aws-lambda.html>, свободный (дата обращения: 12.11.2019).
22. **Gorodetsky, V.** 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, May 14–18, 2007). – Honolulu, 2007. – P. 41–54.
23. **Волчихин, В. И.** Абстрактное и структурное моделирование сетей хранения и обработки данных / В. И. Волчихин, С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 4 (20). – С. 3–18.
24. **Волчихин, В. И.** Логико-алгебраические модели и методы в проектировании функциональной архитектуры распределенных систем хранения и обработки дан-

- ных / В. И. Волчихин, С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 2 (22). – С. 3–16.
25. **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.
26. **Карамышева, Н. С.** Методы и модели логического управления дискретными процессами в распределенных вычислительных системах на основе концепции согласования / Н. С. Карамышева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 35–47.
27. **Карамышева, Н. С.** Обобщенная логико-алгебраическая модель и организация мультиагентных метакомпьютерных систем / Н. С. Карамышева // Перспективы науки. – 2011. – № 4. – С. 98–108.
28. **Peterson, J. L.** Petri Net Theory and the Modeling of Systems / J. L. Peterson. – New Jersey : Prentice-Hall, 1981. – 288 p.
29. **Iordache, M. V.** Supervisory Control of Concurrent Systems. A Petri Net Structural Approach / M. V. Iordache, P. J. Antsaklis. – Boston : Birkhauser, 2006. – 281 p.
30. Petri Nets Fundamental Models, Verification and Applications / Edited by Michel Diaz. – John Wiley & Sons, 2009. – 585 p.
31. Методы параллельного микропрограммирования / П. А. Анишев, С. М. Ачасова, О. Л. Бандман и др. – Новосибирск : Наука, 1981. – 182 с.
32. Implementation of the interface for sending messages in agent-oriented cloud/grid systems based on formalized specifications / D. Pashchenko, S. Zinkin, A. Dubravin, N. Karamisheva // In IEEE Proc. of the Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2016) (Moscow, Russia, 12–14 May 2016). – Moscow, 2016. – P. 173–178.
33. **Zinkin, S. A.** Organization of Autonomous Agent-Robots Interactions for Managing a Very Large Distributed Database System in a Metacomputer Environment / S. A. Zinkin, V. B. Mehanov, N. S. Karamisheva V. I. Volchihin // In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (Irkutsk, Russia August 4–9, 2019). – Irkutsk, 2019. – P. 846–851.

### **References**

1. Kumar R., Jain K., Maharwal H., Jain N., Dadhich A. *International Journal of advancement in Engineering technology, Management and Applied Science (IJAET-MAS)*. 2014, vol. 1, no. 2, pp. 111–116.
2. Kumar R. *International Journal of Modern Computer Science and Applications (IJMCSA)*. 2015, vol. 3, no. 1, pp. 42–47.
3. Tanenbaum A. S., Van Steen M. *Distributed Systems: principles and paradigms*. 2nd Edition. Pearson Education, Inc., 2007, 669 p.
4. *FIPA Specifications*. Available at: <http://www.fipa.org/specifications/index.html>, svobodnyy (accessed Nov. 12, 2019).
5. Bordini R. H. et al. *Informatica*. 2006, vol. 30, pp. 33–44.
6. Kravari K., Bassiliades N. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2015, vol. 18 (1), no. 11, pp. 1–18.
7. Cynthia N., Gregory M. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2009, vol. 12, no. 2 2. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>.
8. Bellifemine F. L., Caire G., Greenwood D. *Developing multi-agent systems with JADE*. Wiley, 2007, 300 p.
9. *Java Agent Development Environment (JADE)*. Available at: <http://jade.tilab.com/>, svobodnyy (accessed Nov. 12, 2019).

10. Yadav M., Sethi P., Juneja D., Chauhan N. *Int. Journal of Innovations & Advancement in Computer Science*. 2015, vol. 4, Special Issue, pp. 245–251.
11. Evripidou P., Samaras G. *Int. Journal of Parallel Programming*. 2006, vol. 34, no. 5, pp. 429–458.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Dada E. G., Joseph S. B., Mishra M. K. *Radioelectronics&Informatics*. 2010, no. 4, pp. 16–20.
16. Lange D., Oshima M. *Programming and deploying Java mobile agents with aglets*. Addison : Wesley Professional., 1998, 256 p.
17. Stel'makh S. *Shest' klyuchevykh preimushchestv besservernoy arkhitektury* [Six key advantages of serverless architecture]. Available at: <https://www.itweek.ru/its/article/detail.php?ID=208802;> svobodnyy (accessed Nov. 12, 2019). [In Russian]
18. *FaaS (Function-as-a-Service)*. Material iz Natsional'noy biblioteki im. N. E. Baumana. Available at: [https://ru.bmstu.wiki/FaaS\\_\(Function-as-a-Service\)](https://ru.bmstu.wiki/FaaS_(Function-as-a-Service)); svobodnyy (accessed Nov. 12, 2019).
19. Krol M., Psaras I. *In Proceedings of ICN '17 (Berlin, Germany, September 26–28, 2017)*. Berlin, 2017, 11 p.
20. Ellis A. *Introducing Functions as a Service – OpenFaaS*. Publ. 08.08.2017. Available at: <https://blog.alexellis.io/introducing-functions-as-a-service/>; svo-bodnyy (accessed Nov. 12, 2019).
21. Haines S. *Serverless computing with AWS Lambda, 2018*. Available at: <https://www.javaworld.com/article/3210726/serverless-computing-with-aws-lambda.html>; svobodnyy (accessed Nov. 12, 2019).
22. Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S. *The AAMAS Sixth International Work-shop on Agents and Peer-to-Peer. Computing (AP2PC 2007) (Honolulu, May 14–18, 2007)* [ ]. Honolulu, 2007, pp. 41–54.
23. Volchikhin V. I., Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 4 (20), pp. 3–18. [In Russian]
24. Volchikhin V. I., Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 2 (22), pp. 3–16. [In Russian]
25. Zinkin S. A. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies]. 2008, no. 10, pp. 20–27. [In Russian]
26. Karamysheva N. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 1 (17), pp. 35–47. [In Russian]
27. Karamysheva N. S. *Perspektivy nauki* [Prospects of science]. 2011, no. 4, pp. 98–108. [In Russian]
28. Peterson J. L. *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. New Jersey: Prentice-Hall, 1981, 288 p.
29. Iordache M. V., Antsaklis P. J. *Supervisory Control of Concurrent Systems. A Petri Net Structural Approach*. Boston: Birkhauser, 2006, 281 p.
30. *Petri Nets Fundamental Models, Verification and Applications*. Edited by Michel Diaz. John Wiley & Sons, 2009, 585 p.

31. Anishev P. A., Achasova S. M., Bandman O. L. et al. *Metody parallel'nogo mikroprogramirovaniya* [Methods of parallel microprogramming]. Novosibirsk: Nauka, 1981, 182 p. [In Russian]
32. Pashchenko D., Zinkin S., Dubravin A., Karamisheva N. *In IEEE Proc. of the Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON 2016). (Moscow, Russia, 12–14 May 2016)*. Moscow, 2016, pp. 173–178.
33. Zinkin S. A., Mehanov V. B., Karamisheva N. S., Volchihin V. I. *In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (Irkutsk, Russia August 4–9, 2019)*. Irkutsk, 2019, pp. 846–851.

---

***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. 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.

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

УДК 62.935.2

DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-4

*А. С. Ишков, Р. А. Лемаев, Г. А. Солодимова*

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ IGBT-МОДУЛЕЙ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются технические средства контроля, позволяющие проводить диагностику состояния изоляции композиционного материала путем регистрации частичных разрядов. Предметом исследования являются процессы появления электрических разрядов вблизи дефекта в диэлектрике, которые вызывают пробой изоляции и потерю работоспособности IGBT-модуля. Цель работы – разработка методики, которая позволяет проводить оценку технико-экономической эффективности средств измерения и контроля параметров изоляции композиционных материалов для IGBT-модулей.

*Материалы и методы.* Рассмотрено применение нескольких методов качественного и количественного анализа для оценки эффективности различных средств контроля параметров изоляции композиционных материалов. Обосновано применение для решения задачи совокупности универсальных критериев: критерий среднего выигрыша, критерий Лапласа, критерий Вальда, критерий Гурвица, критерий Севиджа.

*Результаты.* Показано, что с целью повышения качества IGBT-модулей технически целесообразно проводить диагностику параметров изоляции композиционных материалов путем анализа характеристик частичных разрядов. Выявлено, что характеристики частичных разрядов достаточно хорошо коррелируют с размерами дефектов в диэлектрике, т.е. позволяют определять степень дефектности изоляционной конструкции. Определены оптимальные показатели качества средств контроля параметров изоляции композиционных материалов.

*Выводы.* Предложена методика, позволяющая оптимизировать выбор технического средства применительно к конкретным условиям его использования. Приведен пример расчета технико-экономической эффективности выбора средств контроля параметров изоляции с учетом различных критериев оценивания сложных систем, действующих в условиях неопределенности.

---

© Ишков А. С., Лемаев Р. А., Солодимова Г. А., 2019. 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:** сопротивление изоляции, частичные разряды, критерий Лапласа, критерий Севиджа.

A. S. Ishkov, R. A. Lemaev, G. A. Solodimova

## IMPROVING THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF MEANS OF CONTROL OF ISOLATION PARAMETERS OF COMPOSITIONAL MATERIALS FOR IGBT-MODULES

### **Abstract.**

*Background.* The research object is the technical means of control, allowing to diagnose the state of insulation of a composite material by registering partial discharges. The subject of the study is the processes of electric discharges occurrence near a defect in the dielectric, which cause a breakdown of insulation and loss of operability of the IGBT module. The purpose of the work is to develop a methodology that allows to evaluate the technical and economic efficiency of measuring instruments and controlling the insulation parameters of composite materials for IGBT modules.

*Materials and methods.* The application of several methods of qualitative and quantitative analysis to assess the effectiveness of various means of controlling the insulation parameters of composite materials is considered. The application of a set of universal criteria for the solution of the problem is justified: the average payoff criterion, the Laplace criterion, the Wald test, the Hurwitz criterion, the Savage criterion.

*Results.* It is shown that in order to improve the quality of IGBT modules it is technically feasible to diagnose the insulation parameters of composite materials by analyzing the characteristics of partial discharges. It has been revealed that the characteristics of partial discharges correlate quite well with the sizes of defects in the dielectric, i.e. allow to determine the degree of defectiveness of the insulating structure. The optimal quality indicators of means for controlling the insulation parameters of composite materials are determined.

*Conclusions.* A technique is proposed that allows you to optimize the choice of hardware in relation to the specific conditions of its use. An example is given of calculating the technical and economic efficiency of the choice of means for controlling isolation parameters, taking into account various evaluation criteria for complex systems operating in conditions of uncertainty.

**Keywords:** insulation resistance, partial discharges, Laplace criterion, Savage criterion.

### **Введение**

Растущие требования по энергосбережению и резкий рост сектора возобновляемых источников энергии привели к росту спроса на изделия силовой электроники. К изделиям силовой электроники можно отнести мощные транзисторы, диоды, тиристоры и т.п., позволяющие переключать токи от 10 А и выше. Такие приборы широко используются в энергетике, станкостроении, железнодорожном транспорте, авиации, судостроении, военной технике. Особый интерес представляют IGBT-модули, реализующие в одном кристалле полевые и биполярные транзисторы, такие как схемы управления и активной защиты. IGBT-модули широко используются в качестве мощных электронных ключей, способных переключать токи до 2 кА при напряжении до 3,5 кВ при частотах до 70 кГц. На базе этих модулей строят частотно-

регулируемые приводы, являющиеся основными узлами ветрогенераторов и солнечных батарей.

Высокая тепловая нагрузка, присущая современным IGBT-модулям, ставит перед материаловедами задачу по разработке новых высокоэффективных материалов, не содержащих дефицитных и дорогих компонентов, с низким коэффициентом теплового расширения, высоким сопротивлением изоляции и другими теплофизическими характеристиками, совместимыми с полупроводниковыми материалами. Наиболее полно этим требованиям отвечают композиционные материалы, которые состоят, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью, жесткостью и т.д. Сочетание разнородных веществ позволяет получить новый материал, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим и электрическим свойствам.

Известно, что выбор средств измерений и контроля является одним из основных факторов, определяющим качество измерений. При выборе средства измерений необходимо учитывать номенклатуру измеряемых физических величин, реализуемый метод измерения, диапазон измерения, погрешность измерений, стоимость и срок службы средства измерений и контроля, сложность использования, условия окружающей среды при проведении измерений. Зачастую при выборе конкретного средства измерения и контроля вследствие отсутствия одного критерия их выбора приходится отдавать предпочтение одним факторам, а другие факторы учитывать в меньшей степени. В связи с этим необходима разработка методики, которая позволяет проводить оценку технико-экономической эффективности средств измерения и контроля параметров изоляции композиционных материалов.

## 1. Материал и методика

Качество изоляции изделий из композиционных материалов проверяется при проведении прямо-сдаточных испытаний путем воздействия на объект повышенным напряжением в объеме и нормах согласно [1, 2]. Однако такие испытания являются разрушающими методами контроля и позволяют выявить лишь факт соответствия или несоответствия изоляция установленным требованиям к кратковременной электрической прочности. В связи с этим целесообразно применение неразрушающих методов, которые обеспечивают контроль текущего состояния испытуемого изделия под рабочим напряжением в рабочих условиях эксплуатации. Широко применяемыми в промышленности методами неразрушающего контроля параметров изоляции являются:

1. Методы контроля электрических характеристик изоляции (сопротивление, емкость, тангенс угла диэлектрических потерь). Данные методы основаны на зависимости электрической прочности от наличия и величины в изоляции загрязняющих примесей.

2. Методы контроля физико-химических показателей, выделяющихся при разложении изоляции.

3. Методы температурного контроля с использованием термодатчиков или тепловизоров.

Методы контроля электрических характеристик являются наименее затратными с точки зрения стоимости проведения испытаний и используемого оборудования. Вторая группа методов требует использования достаточно дорогих газовых и массогабаритных хроматографов, к тому же анализ может проводиться только в специализированных физико-химических лабораториях. Третья группа методов основана на исследовании локальных температурных полей, возникающих вследствие перегрева, вызванного дефектами изоляции.

Особенность композиционных материалов заключается в существенной неоднородности их структуры, анизотропии свойств, большом разнообразии типов армирования (однонаправленный, продольно-поперечный, комбинированный и др.), наличии специфических физических свойств: высокое электроизоляционное качество, низкая теплопроводность, звукоизоляция, большой разброс физико-механических характеристик, малые значения плотности ( $0,02-2,0 \text{ г/см}^3$ ).

Основными дефектами, влияющими на параметры изоляции композиционных материалов для IGBT-модулей, являются воздушные и газовые включения. Газообразные включения в изоляции возникают из-за несовершенства технологии изготовления изделий (неполная пропитка, усадочные каверны) или образуются в процессе эксплуатации вследствие чрезмерно высоких механических воздействий (трещины, расслоения), местных разогревов (термическое разложение изоляции с выделением газа) и по другим причинам [3].

Если IGBT-модуль прошел приемосдаточные испытания, то необнаруженные (или не проявившиеся) при их проведении дефекты изоляции (которые практически всегда имеются), не вызывают пробой изоляции в нормальных рабочих условиях и потерю работоспособности изделия. Однако при дальнейшей эксплуатации изделия эти дефекты развиваются в связи с появлением сравнительно небольших электрических разрядов в зоне повышенной напряженности поля вблизи дефекта, которые называют частичными разрядами [1].

В связи с низким значением диэлектрической проницаемости воздуха напряженность поля в воздушной полости значительно превосходит среднюю напряженность поля в полости изоляции. Поэтому в воздушной полости уже при рабочем напряжении возникают ионизационные процессы – частичные разряды. Такой разряд вызывает импульс тока порядка  $10^{-7}-10^{-8}$  с, снижение амплитуды рабочего напряжения и распространение в окружающее пространство электромагнитных волн частотой от 10 кГц до 100 МГц.

На рис. 1 представлено развитие во времени частичных разрядов при воздействии на изделие переменного напряжения.

После погасания разряда напряжение на воздушной полости начинает нарастать от значения  $U_{\text{вп}}$  по кривой, соответствующей изменению приложенного напряжения, смещенной по вертикали на значение постоянной составляющей, возникшей в результате появления зарядов на поверхности воздушной полости. Когда напряжение на воздушной полости достигнет значения  $U_{\text{вз}}$ , процесс повторяется. Таким образом, разряды в композиционном материале с дефектом повторяются через промежутки времени, соответствующие изменению напряжения [2]:  $\Delta U = U_{\text{вз}} - U_{\text{вп}}$ .

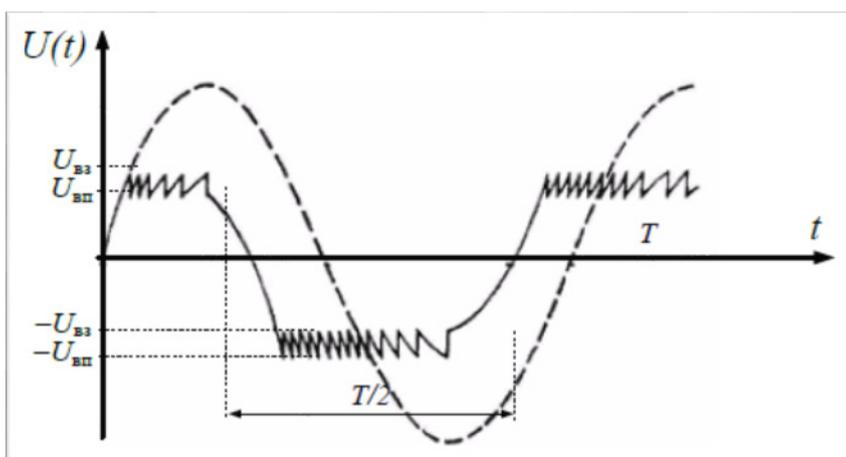


Рис. 1. Развитие частичных разрядов во времени

Под действием частичных разрядов происходит постепенный процесс разрушения изоляции композиционного материала, так как увеличивается размер полости дефекта и интенсивность частичных разрядов. Увеличение области дефекта в изоляционном материале влечет за собой процесс энерговыделения в его зоне, в результате разрушение изоляции ускоряется за счет термических процессов. Когда область дефекта в материале достигает достаточно больших размеров, становится возможным сквозной пробой изоляции. Таким образом, появление частичных разрядов свидетельствует о наличии дефекта изоляции, причем данный метод позволяет обнаружить наличие дефекта на самой ранней стадии его возникновения. Данный метод позволяет оценивать текущее состояние параметров изоляции и возможность дальнейшей эксплуатации IGBT-модулей.

## 2. Результаты

В настоящее время на отечественном рынке представлено несколько типов средств контроля, позволяющих проводить диагностику состояния изоляции путем регистрации частичных разрядов. По результатам анализа рынка средств измерения параметров частичных разрядов (ЧР) была составлена сводная табл. 1.

Процесс выбора средства измерения параметров частичных разрядов можно рассматривать как метрологическую систему, функционирующую в условиях неопределенности [4]. Неопределенность возникает в том случае, когда ситуация имеет несколько исходов и вероятность каждого исхода неизвестна. Зачастую при выборе конкретного средства измерения и контроля вследствие отсутствия одного критерия их выбора приходится отдавать предпочтение одним факторам, а другие факторы учитывать в меньшей степени. В связи с этим необходимо применение методов, которые позволяют проводить оценку эффективности выбора средств измерения и контроля, необходимых для решения поставленной задачи.

Любая сложная система характеризуется множеством факторов неопределенности: неопределенность внешней среды, неопределенность, связанная с характером, вариантами и моделью развития, неопределенность ха-

рактических элементов, составляющих данную систему их взаимоотношений, и т.д. Для оценки систем, действующих в условиях неопределенности, используются самые различные методы качественного и количественного анализа. К наиболее известным методам оценки следует в мировой практике отнести: метод сценариев, методы теории игр, метод дерева решений, имитационное моделирование по методу Монте-Карло [4].

Таблица 1  
Показатели качества средств контроля параметров частичных разрядов

Тип	Диапазон измерения заряда, пКл	Диапазон измерения частоты следования ЧР, МГц	Длительность регистрируемых импульсов, мкс	Погрешность измерения ЧР, пКл, не более	Количество каналов регистрации	Связь с персональным компьютером	Масса, кг	Габаритные размеры, мм	Стоимость, тыс. руб.
ИЧР-201	1–10000	0,1–5	от 0,1	±10	3	RS-485	6	110//170//250	100
R2200	10–10000	0,1–10	от 0,07	±5	9	USB	14	260/250//80	300
PD-Analyzer-3	1–10000	0,1–30	от 0,03	±10	1	USB	10	220/160//45	120
HVPD Longshot	1–10000	0,1–30	от 0,03	±2	1	USB	7	292/399//131	500
HVPD Mini-Monitor	1–10000	0,1–30	от 0,03	±5	1	USB	10	520/280//175	500

Метод сценариев представляет собой ситуационный анализ при прогнозировании вероятности появления тех или иных событий как результата принятия решений в условиях неопределенности. Как правило, для решения проблемы создается несколько сценариев, в которых учитывается влияние разных факторов. Теория игр является математической теорией оптимального поведения в условиях конфликтной ситуации. Метод дерева решений использует модель разветвляющегося по каким-либо условиям процесса. Модель представляет собой графическое изображение связей основных и последующих вариантов управленческих решений. В ней приводятся сведения об основных результатах каждого решения и ожидаемой эффективности.

Метод имитационного моделирования Монте-Карло предполагает наличие математической модели какого-либо интересующего показателя, которая подвергается ряду расчетов с использованием исходных данных, которые являются неопределенными и потому в процессе анализа полагаются случайными величинами.

В настоящее время нет универсального метода, который позволяет решить задачу оценки эффективности выбора средства измерения для контроля

изоляции. Поэтому для решения данной задачи целесообразно применение совокупности универсальных критериев: критерий среднего выигрыша, критерий Лапласа, критерий Вальда, критерий Гурвица, критерий Севиджа [5].

Анализ технических параметров изоляции композиционных материалов для IGBT-модулей показал, что средства контроля должны соответствовать показателям, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальные показатели качества средства контроля параметров изоляции композиционных материалов

Наименование технического показателя	Значение показателя
Диапазон измерений кажущегося заряда	от 1,0 пКл до 10000 пКл
Диапазон измерения частоты следования ЧР, МГц	от 0,1 до 5
Длительность регистрируемых импульсов, мкс	от 0,05
Погрешность измерения ЧР, пКл, не более	±5
Метод измерения	Электрический/ электромагнитный
Количество каналов регистрации	5
Связь с персональным компьютером	USB
Масса, кг	5
Габаритные размеры, мм	200/200/500
Стоимость, тыс. руб.	100,0

С целью оптимального выбора одного из приведенных в табл. 1 средств измерения параметров частичных разрядов авторами выполнена оценка их эффективности с учетом положений системного анализа. Для решения поставленной задачи будут поочередно использованы упомянутые выше критерии. Для применения критериев выбора составлена таблица эффективности (табл. 3).

Таблица 3

Таблица эффективности

$a/K$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$
$a_1$	1,0	1	0,5	0,5	1	0,6	0	0,83	4,3
$a_2$	0,9	2	0,71	1	2	1,8	1	0,36	3,8
$a_3$	1,0	6	1,6	0,5	2	0,2	1	0,50	1,6
$a_4$	1,0	2	1,6	2,5	1	0,2	1	0,71	1,3
$a_5$	1,0	6	1,6	1	1	0,2	1	0,50	0,8

В табл. 3 параметром  $a_i$  является действительное значение технического показателя средства контроля, коэффициентом  $K_i$  является отношение желаемого значения технического показателя качества к действительному в случае, если действительное значение показателя меньше желаемого, и наоборот, если действительное значение показателя больше желаемого.

**Оценка эффективности с помощью критерия среднего выигрыша.** Данный критерий предполагает задание так называемых вероятностей состояния  $p_j$ . Эффективность оценивается как среднее ожидаемое значение оценок

эффективности по всем возможным вариантам [5]:  $K(a_i) = \sum_{j=1}^t p_j k_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, t$ . Оптимальный вариант выбора тот, у которого максимальное значение эффективности [5]:  $K_{\text{опт}}(a_i) = \max_i \sum_{j=1}^t p_j k_{ij}$ . Пусть вероятности для рассматриваемого случая составляют:  $p_1 = 0,2$ ;  $p_2 = 0,1$ ;  $p_3 = 0,2$ ;  $p_4 = 0,3$ ;  $p_5 = 0,05$ . Тогда таблица эффективности примет вид табл. 4.

Таблица 4

Оценивание по критерию среднего выигрыша

$a/K$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$	$K(a_i)$
$a_1$	1,00	1	2	1	1,00	0,625	2,5	1,8	1	1,00	1	1,21
$a_2$	0,83	0	0,1	0	0,57	1	0,5	1,2	0	1,25	1	0,73
$a_3$	1,25	0	0,1	0	0,71	1	0,5	1,2	0	1,25	1	0,94
$a_4$	1,00	0	1	0	0,71	1	0,5	1,2	0	1,05	1	0,89
$a_5$	0,83	0	1	1	0,86	0,625	1	1,2	0	0,83	1	0,83
$P$	0,5	0,05	0,1	0,01	0,02	0,01	0,05	0,05	0,03	0,08	0,1	

Анализ табл. 4 показывает, что по техническим параметрам лучшими показателями качества обладает прибор с показателем  $K(a_i) = 1,21$ , стоящий на первой позиции в табл. 1.

**Оценка технико-экономической эффективности средств контроля с помощью критерия Лапласа.** В основе оценки эффективности выбора по критерию Лапласа лежит предположение, что если о состоянии системы ничего неизвестно, то все события можно считать равновероятными [5]:

$$K(a_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^t k_{ij}.$$

Критерий эффективности для оптимальной системы определяется по следующей формуле [5]:

$$K_{\text{опт}}(a_i) = \max_i \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^t p_j k_{ij} \right).$$

Пусть все события равновероятны, тогда среднее ее значение составит  $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = 1/6 = 0,17$ . Значение эффективности выбора равны:  $K(a_1) = 2,32$ ,  $K(a_2) = 1,08$ ,  $K(a_3) = 1,17$ ,  $K(a_4) = 1,24$ ,  $K(a_5) = 1,39$ . Анализ эффективности по критерию Лапласа показал, что оптимальным вариантом выбора является первый прибор в табл. 1 со значением  $K(a_1) = 2,32$ .

**Оценка эффективности средств контроля с помощью критерия Вальда,** который гарантирует определенный положительный результат при худших условиях. Критерий ориентирован на достижение минимального значения положительного эффекта. В каждой строке таблицы эффективности находится минимальное значение эффективности [5]:  $K(a_i) = \min_j k_{ij}$ . Оптимальным вариантом выбора считается строка с максимальным значением эф-

эффективности [5]:  $K_{\text{опт}} = \max_i (\min_j k_{ij})$ . Применение критерия Вальда для рассматриваемой задачи дает следующие оценки эффективности:  $K(a_1) = 0,625$ ,  $K(a_2) = 0$ ,  $K(a_3) = 0$ ,  $K(a_4) = 0$ ,  $K(a_5) = 0$ . Оптимальным выбором по данному критерию является первый прибор в табл. 1, так как  $K(a_1) = 0,625$ .

**Оценка эффективности выбора с помощью критерия максимакса**, согласно которому процесс выбора происходит по максимальному значению эффективности  $K(a_i)$ :  $K(a_i) = \max(k_{ij})$ . Результаты оценок средств контроля на основе максимаксного критерия:  $K(a_1) = 2,5$ ,  $K(a_2) = 1,25$ ,  $K(a_3) = 1,25$ ,  $K(a_4) = 1,2$ ,  $K(a_5) = 1,2$ . Оптимальным вариантом выбора является прибор № 1.

**Анализ эффективности выбора с помощью критерия Гурвица**. При его использовании для каждой ситуации определяется «взвешенный» результат путем учета как отрицательного, так и положительного результатов. Вес каждого определяется так называемыми коэффициентами оптимизма  $\alpha$ , при этом  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Эффективность выбора определяется как взвешенная сумма максимальной и минимальной оценок [5]:  $K(a_i) = \alpha \max_j k_{ij} + (1 - \alpha) \min_j k_{ij}$ . Условие оптимальности записывается в следующем виде [5]:

$$K_{\text{опт}}(a_i) = \max_i (\alpha \max_j k_{ij} + (1 - \alpha) \min_j k_{ij}).$$

Пусть коэффициент оптимизма  $\alpha = 0,5$ , тогда значения эффективности равны:  $K(a_1) = 1,56$ ,  $K(a_2) = 0,625$ ,  $K(a_3) = 0,625$ ,  $K(a_4) = 0,6$ ,  $K(a_5) = 0,6$ , следовательно, оптимальным вариантом выбора является прибор № 1.

**Оценка эффективности системы в соответствии с критерием Сэвиджа**. Критерий Сэвиджа минимизирует потери эффективности при наихудших условиях. Для проведения оценки таблица эффективности должна быть преобразована в таблицу риска (табл. 5). Каждый элемент таблицы риска определяется как разность между максимальным и текущим значениями оценок эффективности в столбце [5]:  $\Delta k_{ij} = \max_i k_{ij} - k_{ij}$ . После преобразования таблицы проводится расчет оптимального значения [5]:

$$K_{\text{опт}} = \min_i (\max_j \Delta k_{ij}).$$

Таблица 5

Таблица риска

a/K	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$
$a_1$	0,25	0	0	0	1,00	0,375	2,5	0	0	0,25	0
$a_2$	0,42	1	0,9	1	0,43	0	2,0	0,6	1	0	0
$a_3$	0	1	0,9	1	0,29	0	2,0	0,6	1	0	0
$a_4$	0,25	1	1	1	0,29	0	2,0	0,6	1	0,2	0
$a_5$	0,42	1	1	0	0,14	0,375	1,5	0,6	1	0,42	0

Значения эффективности равны:  $K(a_1) = 2,5$ ,  $K(a_2) = 2,0$ ,  $K(a_3) = 2,0$ ,  $K(a_4) = 2,0$ ,  $K(a_5) = 1,5$ , следовательно, оптимальным вариантом выбора является прибор № 5.

Кроме использования критериев эффективности, также целесообразно выполнить анализ эффективности с учетом цены приборов. С этой целью

составлена таблица эффективности с учетом цены прибора. Коэффициент эффективности (табл. 6) вычисляется по формуле [5]:

$$K_{эi} = \frac{C_{\text{опт}}}{K(a_i)C_i},$$

где  $C_i$  – рыночная цена прибора;  $C_{\text{опт}}$  – оптимальная для потребителя цена ( $C_{\text{опт}} = 10,0$  тыс. руб.). Полученные результаты сведены в табл. 6.

Таблица 6

Оценивание технико-экономической эффективности

$a_i$	Рыночная цена прибора	$K(a_i)$	$Kэ$
$a_1$	10,0	1,21	0,83
$a_2$	3,0	0,73	4,55
$a_3$	2,0	0,94	5,30
$a_4$	4,0	0,89	2,80
$a_5$	5,0	0,83	2,42

Анализ данных табл. 6 показывает, что с учетом цены лучшими экономическими показателями обладает прибор с показателем  $K_{э3} = 5,3$ . Данный прибор имеет самую низкую цену при относительно хороших технических показателях качества.

### 3. Обсуждение

Результаты оценивания средств измерения параметров частичных рядов сведены в табл. 7, анализ показателей которой показал, что согласно большинству критериев выбор прибора ИЧР-201 является наиболее оптимальным.

Таблица 7

Результаты оценивания показателей качества средств измерения параметров частичных рядов

Тип прибора	Значения эффективности $K(a_i)$ по критериям						
	среднего выигрыша	технико-экономический	Лапласа	Вальда	Максима	Гурвица	Сэвиджа
ИЧР-201	1,21	0,83	2,32	0,625	2,5	1,56	2,5
R2200	0,73	4,55	1,08	0	1,25	0,625	2,0
PD-Analyzer-3	0,94	5,3	1,17	0	1,25	0,625	2,0
HVPD Longshot	0,89	2,8	1,24	0	1,2	0,6	2,0
HVPD Mini-Monitor	0,83	2,42	1,39	0	1,2	0,6	1,5

### Заключение

Таким образом, предложенная методика позволяет не упустить при рассмотрении требуемые характеристики средства измерения и оптимизировать его выбор применительно к конкретным условиям использования.

**Библиографический список**

1. **Вдовико, В. П.** Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В. П. Вдовико. – Новосибирск : Наука, 2007. – 155 с.
2. **Андреев, А. М.** Частичные разряды и методы их измерения / А. М. Андреев, А. Е. Монастырский, Ю. В. Соловьев, А. И. Таджикибаев ; под ред. А. И. Таджикибаева. – Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2010. – 48 с.
3. **Ишков, А. С.** Исследование влияния отказа на техническое состояние изделий электронной техники / А. С. Ишков, Г. А. Солодимова, П. А. Блинков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 69–71.
4. **Емельянов, А. А.** Имитационное моделирование в управлении рисками / А. А. Емельянов. – Санкт-Петербург : Инжэкон, 2000. – 376 с.
5. **Анфилатов, В. С.** Системный анализ в управлении / В. С. Анфилатов, А. А. Емельянов, А. А. Кукушкин ; под ред. А. А. Емельянова. – Москва : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

**References**

1. Vdoviko V. P. *Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniya* [Partial discharges in diagnosing high-voltage equipment]. Novosibirsk: Nauka, 2007, 155 p. [In Russian]
2. Andreev A. M., Monastyrskiy A. E., Solov'ev Yu. V., Tadzhibaev A. I. *Chastichnye razryady i metody ikh izmereniya* [Partial discharges and methods of their measurement]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2010, 48 p. [In Russian]
3. Ishkov A. S., Solodimova G. A., Blinkov P. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an international symposium Reliability and Quality]. 2018, no. 2, pp. 69–71. [In Russian]
4. Emel'yanov A. A. *Imitatsionnoe modelirovanie v upravlenii riskami* [Simulation in risk management]. Saint-Petersburg: Inzhekon, 2000, 376 p. [In Russian]
5. Anfilatov V. S., Emel'yanov A. A., Kukushkin A. A. *Sistemnyy analiz v upravlenii* [System analysis in management]. Moscow: Finansy i statistika, 2002, 368 p. [In Russian]

---

**Ишков Антон Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

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

**Ishkov Anton Sergeevich**

Candidate of engineering sciences,  
associate professor, sub-department of radio  
engineering and radio electronic systems,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Лемаев Роман Андреевич**

кандидат технических наук, начальник  
отдела метрологии, Научно-  
производственное предприятие «Рубин»  
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: [lemaev@ro.ru](mailto:lemaev@ro.ru)

**Lemaev Roman Andreevich**

Candidate of engineering sciences,  
chief metrologist, «SPE «Rubin»  
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

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

E-mail: solodimova@mail.ru

**Solodimova Galina Anatol'evna**  
Candidate of engineering sciences,  
associate professor, sub-department  
of information-measuring equipment  
and metrology, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Ишков, А. С. Повышение технико-экономической эффективности средств контроля параметров изоляции композиционных материалов для IGBT-модулей / А. С. Ишков, Р. А. Лемаев, Г. А. Солодимова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 51–62. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-4.

## ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются системы диагностики электрических цепей. Предмет исследования – математические модели цепей и процессов их диагностики. Цель работы – формирование общей постановки задачи диагностики электрических цепей и подходов к ее решению на основе результатов моделирования объекта диагностики и процесса диагностирования.

*Материалы и методы.* Для математического описания объектов диагностики и процессов диагностирования использовались методы анализа, синтеза и идентификации электрических цепей, аппарат линейной алгебры, включая матричное исчисление, методы верификации и валидации математических моделей.

*Результаты.* Дана постановка задачи диагностики электрической цепи и сформулирован общий подход к ее решению, который заключается в построении алгоритмических моделей процесса диагностирования на основе результатов многоуровневого моделирования объекта диагностики.

*Выводы.* Предложенный подход может служить методологической основой для совершенствования известных и поиска новых методов и средств диагностики.

**Ключевые слова:** диагностика, электрическая цепь, моделирование, импеданс, адмитанс.

S. K. Kuroedov, A. V. Svetlov, V. V. Smogunov, P. P. Churakov

## DIAGNOSTIC MODELS OF LUMPED ELECTRIC CIRCUITS

### Abstract.

*Background.* The objects of the study are diagnostic systems of electrical circuits. The research subject is mathematical models of circuits and processes of their diagnostics. The aim of the study is to form a general statement of the problem of diagnostics of electric circuits and approaches to its solution based on the results of modeling the object of diagnosis and the process of diagnosis.

*Materials and methods.* Methods of analysis, synthesis and identification of electric circuits, apparatus of linear algebra, including matrix calculus, methods of verification and validation of mathematical models were used for mathematical description of diagnostic objects and diagnostic processes.

*Results.* The statement of the problem of diagnostics of an electric circuit is given and the general approach to its decision which consists in construction of algorithmic models of diagnostics on the basis of the results of multilevel modeling of the object of diagnostics is formulated.

*Conclusions.* The proposed approach can serve as a methodological basis for improving the known and searching for new methods and diagnostic tools.

**Keywords:** diagnostics, electric circuit, modeling, impedance, admittance.

### **Введение**

Задача диагностики электрических цепей различного назначения, включая цепи радиоэлектронной аппаратуры, вычислительной техники и силовой электроники, имеет большое число практически важных вариантов, которые различаются видом определяемого состояния и типом электрической цепи, степенью априорной неопределенности ее характеристик, глубиной диагностирования, условиями проведения и формой представления результатов диагностического эксперимента [1].

Целью диагностики цепи на макроуровне может быть определение состояний ее входов, выходов и функций, используемых для функционального контроля. Внутрисхемный контроль и локализация неисправностей аппаратуры могут быть осуществлены по результатам диагностики ее цепей на микроуровне в виде состояний входов, выходов и функций компонентов и связей между компонентами [2].

Указанные особенности задачи диагностики электрических цепей обуславливают многообразие подходов к ее решению и затрудняют разработку общей теории и оптимальных методов экспериментального определения состояния цепей с использованием современных достижений в области моделирования, анализа, синтеза и идентификации систем, теории планирования эксперимента и электрических измерений.

### **1. Многоуровневые диагностические модели электрических цепей**

В работе [2] диагностику цепи предложено рассматривать как процесс преобразования ее многоуровневой модели по результатам диагностического эксперимента. Модель наиболее высокого уровня – макромоделю – представляет цепь в виде одного элемента, а элементы модели более низкого уровня связаны с макромоделю отношением принадлежности. Множество фазовых переменных макромоделю является подмножеством множества всех фазовых переменных микромоделю, функции же макромоделю связаны с функциями элементов микромоделю отношением композиции.

Указанный подход к описанию процессов диагностики можно обобщить, выбирая уровни модели объекта диагностики по другим признакам и включая в состав данных уровней соответствующие модели диагностических экспериментов. Одним из таких признаков может служить степень неопределенности модели цепи и диагностического эксперимента. Наибольшей степенью неопределенности характеризуются априорные модели цепи и диагностического эксперимента. Последние строятся на основе априорных моделей цепей соответствующего уровня и используются для планирования и обработки результатов экспериментов. Результаты обработки экспериментальных данных представляются в виде апостериорных моделей эксперимента и цепи.

Другим признаком уровня модели является ее сложность, которую можно оценить, например, по числу фазовых переменных макромоделю, количеству элементов микромоделю и связей между ними, числу членов функ-

циональных рядов, используемых для описания функций моделируемой цепи и ее элементов.

Увеличение сложности модели для более адекватного описания цепи усложняет модель эксперимента и обработку его результатов. Это может вызвать увеличение погрешности экспериментальных данных и неустойчивость результатов их обработки. Априорную оценку точности экспериментальных данных и устойчивости результатов их обработки можно получить в результате верификации построенной модели. Процедура верификации априорной модели должна предусматривать также проверку ее соответствия постановке задачи диагностики и априорной информации об объекте диагностики. При отрицательном результате верификации необходимо изменить уровень сложности модели таким образом, чтобы априорные оценки точности и устойчивости удовлетворяли выбранным критериям.

Преобразования моделей различного уровня сложности можно рассмотреть на примере макромоделей нелинейной нестационарной автономной цепи и соответствующей модели диагностического эксперимента. Вид математического описания цепи с сосредоточенными параметрами на макроуровне определяется выбором независимых переменных – координат модели, которые вместе с зависимыми переменными характеризуют состояние моделируемой цепи. В соответствующей модели активного эксперимента выбранные координаты представляют воздействие на диагностируемую цепь, а зависимые переменные – ее реакцию на воздействие, при этом все координаты модели должны удовлетворять условию управляемости, а зависимые переменные – условию наблюдаемости.

В координатной системе напряжений  $u_i$  узловых пар  $(i, i')$ ,  $i \in \overline{1, N}$ , где  $N$  – общее число узловых пар, зависимыми переменными являются токи  $i_j$  узловых пар  $(j, j')$ ,  $j \in \overline{1, N}$ , которые замыкаются через внешние цепи. Нелинейная нестационарная автономная цепь в указанной системе координат в режиме малого сигнала описывается выражением

$$\mathbf{i} = \int_{-\infty}^t \mathbf{h} \mathbf{u} d\tau + \mathbf{i}_a, \quad (1)$$

где  $\mathbf{i} = [i_j(t)]^T$ ,  $\mathbf{u} = [u_i(\tau)]^T$  и  $\mathbf{i}_a = [i_{aj}(t, \mathbf{U}_0)]^T$  – векторы-столбцы токов,

напряжений и автономных токов узловых пар;  $\mathbf{h} = [h_{ji}(t, \tau, \mathbf{U}_0)]$  – квадратная

матрица малосигнальных импульсных характеристик цепи;  $\mathbf{U}_0 = [U_{0i}]^T$  –

вектор-столбец напряжений смещения  $U_{0i}$  узловых пар;  $T$  – символ транспонирования матрицы. При гармоническом воздействии на цепь, изменением параметров которой за время эксперимента можно пренебречь, малосигнальная модель (1) преобразуется к следующему виду:

$$\mathbf{I} = [\mathbf{YI}_a] \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{I} = [I_j]^T$ ,  $\mathbf{U} = [U_i]^T$  и  $\mathbf{I}_a = [I_{aj}]^T$  – векторы-столбцы комплексных амплитуд токов, напряжений и автономных токов узловых пар;  $\mathbf{Y} = [Y_{ji}]$  –

квадратная матрица узловых адмитансов.

Для экспериментального определения элементов блочной матрицы  $[\mathbf{YI}_a]$  необходимо сформировать многомерные воздействия на цепь в виде гармонических напряжений  $u_i$ , комплексные амплитуды  $U_{im}$  которых описываются столбцами матрицы  $\mathbf{U}_M = [U_{im}]$ , и измерить комплексные амплитуды  $I_{jm}$  токов  $i_j$ , представляемых элементами матрицы  $\mathbf{I}_M = [I_{jm}]$  [3].

Результат организованных таким образом косвенных измерений может быть получен при условии, что матрица  $\mathbf{V}_M = [\mathbf{U}_M^T \mathbf{e}_{1,M}^T]^T$  с блоком  $\mathbf{e}_{1,M}$  в виде  $M$ -мерного вектора-столбца с единичными элементами является матрицей полного ранга:

$$[\mathbf{YI}_a] = \mathbf{I}_M \mathbf{V}_M^* (\mathbf{V}_M \mathbf{V}_M^*)^{-1}, \quad (3)$$

где \* – символ сопряжения матрицы.

При определении адмитансов  $Y_{ji}$  элементы  $I_{aj}$  блока  $\mathbf{I}_a$  матрицы  $[\mathbf{YI}_a]$  могут рассматриваться как аддитивные погрешности измерения элементов  $I_{jm}$  матрицы  $\mathbf{I}_M$ . Для коррекции данной погрешности необходимо предварительно провести эксперимент, модель которого описывается выражением

$$\mathbf{I}_0 = [\mathbf{YI}_a] \begin{bmatrix} \mathbf{\theta}_N \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{I}_0$  – вектор-столбец комплексных амплитуд токов короткого замыкания узловых пар цепи;  $\mathbf{\theta}_N$  – нулевой  $N$ -мерный вектор-столбец. После введения поправки  $\mathbf{I}'_M = \mathbf{I}_M - \mathbf{I}_0 \mathbf{e}_M^T$  результатов измерений  $I_{jm}$  модель (4) преобразуется к виду модели экспериментального определения  $Y_{ji}$  неавтономной цепи:

$$\mathbf{I}'_M = [\mathbf{YI}_a] \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{U}_M \\ \mathbf{e}_M^T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{\theta}_N \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{e}_M^T \right\} = \mathbf{YU}_M. \quad (5)$$

Точность результатов эксперимента зависит от точности воспроизведения гармонических напряжений  $u_i$ , точности измерения комплексных амплитуд токов  $i_j$  и обусловленности системы линейных алгебраических уравне-

ний (5). Для оптимизации плана эксперимента по критерию минимума погрешности косвенных измерений необходимо минимизировать число обусловленности матрицы  $U_M U_M^*$ .

Минимальное число обусловленности матрицы, равное единице, достигается тогда и только тогда, когда данная матрица является масштабной копией унитарной матрицы [5]. По отношению к матрице  $U_M$  это означает, что все столбцы данной матрицы должны быть попарно ортогональны и иметь одинаковые нормы. Данное условие при  $N = M$  удовлетворяется, в частности, для диагональной матрицы  $U_M$  с одинаковыми элементами главной диагонали. Это соответствует плану  $N$ -кратного эксперимента, на каждой стадии которого на одной из узловых пар создается режим заданного гармонического напряжения  $u_i$  с комплексной амплитудой  $U_{im}$ , а на остальных – режим короткого замыкания. По результатам измерений комплексных амплитуд токов узловых пар на каждой стадии формируется соответствующий столбец матрицы  $I_M$ .

Для сокращения общего времени эксперимента необходимо сформировать многомерное ортонормированное воздействие одновременно на все узловые пары. Условие ортогональности для гармонических напряжений  $u_i$  выполняется, если их частоты  $\omega_i = 2\pi n_i T_I$ , где  $n_i$  – целые положительные числа;  $T_I$  – длительность интервала времени, на котором осуществляется определение комплексных амплитуд токов  $i_j$  каждой узловой пары на каждой из частот  $\omega_i = 2\pi n_i T_I$ . Значения  $T_I$  и  $n_i$  выбираются таким образом, чтобы частоты многомерного воздействия находились в определенной, достаточно узкой полосе и числа  $n_i$  не совпадали для различных значений  $i$ . Эти условия выполняются, если  $n_i = n_0 + i$ , где  $n_0$  – целая положительная константа.

## 2. Алгоритмические модели процессов диагностирования

### 2.1. Последовательное диагностирование

Процесс преобразования моделей цепи и диагностического эксперимента различных уровней может быть представлен в виде последовательного, параллельного, циклического алгоритмов или их комбинаций. Примером реализации последовательного алгоритма является преобразование априорной модели цепи определенного уровня иерархии в апостериорную модель этого же уровня с последующим переходом на другой, более высокий или низкий уровень.

На рис. 1,а показана схема алгоритма последовательного преобразования априорной макромоделей  $MC_0^b$ , сформированной на основе априорной информации  $IC^b$  о диагностируемой цепи, в ее апостериорную макромоделю  $MC_0^a$  и апостериорные микромоделей  $MC_1^a, MC_2^a, \dots, MC_n^a$ . Эксперимент  $E_0$  рассматривается в данной схеме как этап процесса диагностирования, который осуществляется на его физическом уровне  $F$ , а преобразования апосте-

приорных моделей  $MC_1^a, MC_1^b, MC_2^a, \dots, MC_n^a$  – как переходы между подуровнями информационного уровня  $I$ .

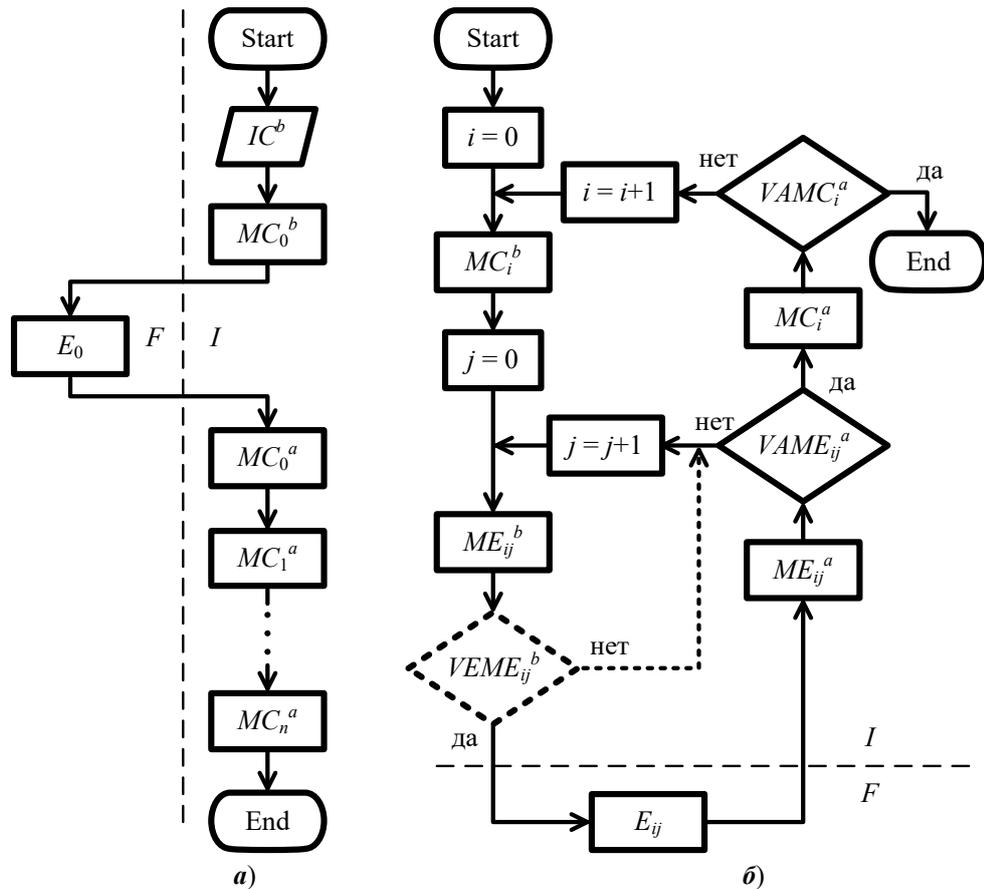


Рис. 1. Схемы последовательного (а) и циклического (б) алгоритмов диагностики

Апостериорная макро модель в координатной системе напряжений узловых пар может быть однозначно преобразована в микро модель цепи с источниками автономных токов  $I_{aj}$ , активными четырехполюсниками в виде источников тока, управляемых напряжениями, и пассивными двухполюсниками:

$$Y = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N Y_{ji} e_j e_i^T, \quad (6)$$

где  $Y_{ji}$  – передаточные адмитансы активных четырехполюсников ( $j \neq i$ );  $Y_{jj}$  – адмитансы пассивных двухполюсников;  $e_j$  –  $N$ -мерный вектор-столбец, все элементы которого, кроме  $j$ -го, равны нулю, а  $j$ -й равен единице.

Если макро модель в канонической системе узловых напряжений, отсчитываемых относительно базисного узла, характеризуется симметричной матрицей  $Y$ , то соответствующая микро модель может быть построена в эле-

ментном базисе независимых источников тока и пассивных двухполюсников с помощью следующего разложения  $\mathbf{Y}$  :

$$\mathbf{A}^T \mathbf{Y}_b \mathbf{A} = \sum_{k=1}^K Y_k \mathbf{A} \mathbf{e}_k (\mathbf{A} \mathbf{e}_k)^T, \quad (7)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица инцидентий;  $\mathbf{Y}_b = \text{diag} \left( \begin{matrix} Y_k \\ k=1, K \end{matrix} \right)$  – диагональная матрица адмитансов  $Y_k$  ветвей;  $K$  – число узлов цепи без учета базисного.

Рассмотренное последовательное преобразование априорной макромоделли, построенной в координатной системе напряжений узловых пар, в апостериорную микромодель лежит в основе метода диагностики, который в [5] назван методом узловых адмитансов. Данный метод позволяет при оптимальном плане эксперимента на макроуровне определить состояния и функции элементов цепи с точностью, близкой к точности воспроизведения и измерения напряжений и токов узловых пар. Недостаток данного метода заключается в необходимости создания на всех узлах цепи режимов заданных напряжений, что для активных цепей и цепей оборудования в режиме его нормальной эксплуатации недопустимо.

Уменьшить число одновременно подключаемых в процессе диагностического эксперимента внешних узлов (полюсов) цепи без существенного изменения ее состояний и функций позволяет метод узловых сопротивлений (импедансов) [1], который заключается в преобразовании апостериорной макромоделли, построенной в системе контурных токов, в апостериорную макромодель – в системе напряжений узловых пар.

Априорная макромодель цепи, используемая для построения модели измерительного эксперимента и его плана, в данном случае дуальна макромоделли (2), построенной в системе узловых напряжений:

$$\mathbf{U} = [\mathbf{Z} \mathbf{U}_a] \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{U} = [U_j]^T$ ,  $\mathbf{I} = [I_i]^T$  и  $\mathbf{U}_a = [U_{aj}]^T$  – векторы-столбцы комплексных ам-

плитуд напряжений, токов и автономных напряжений узловых пар;  $\mathbf{Z} = [Z_{ji}]$  – квадратная матрица узловых импедансов.

$$\begin{matrix} j \in \overline{1, N} \\ i \in \overline{1, N} \end{matrix}$$

Ток  $i_i$  узловой пары  $(i, i')$  в модели (8) определяется как ток контура, включающего узлы  $i$  и  $i'$ , который замыкается через внешние цепи. При косвенных измерениях импедансов  $Z_{ji}$  гармонический ток  $i_i$  представляет одномерное воздействие на диагностируемую цепь, а напряжения  $u_j$  – ее многомерную реакцию, которая для стационарных цепей может быть определена с помощью измерительных преобразователей напряжения, подключаемых к узловым парам  $(j, j')$ , где  $j \in \overline{1, N}$ . Так как при одномерном воздействии  $i_i$

на узловую пару  $(i, i')$  на других узловых парах организуется режим холостого хода, то минимальное число одновременно подключаемых узловых пар цепи на каждой стадии эксперимента равно двум, а для эксперимента в канонической системе координат это число соответствует количеству одновременно подключаемых полюсов цепи, не считая базисного.

Модель эксперимента в координатной системе токов узловых пар также дуальна модели эксперимента в системе напряжений узловых пар. Результат эксперимента на макроуровне в координатной системе токов узловых пар в виде блочной матрицы  $[ZU_a]$  преобразуется в блочную матрицу  $[YI_a]$ :

$$[YI_a] = [Z^{-1} | -Z^{-1}U_a]. \quad (9)$$

Преобразование системы координат апостериорной макромоделю позволяет более просто осуществить переход на микроуровень, используя выражения (6) или (7). Однако при решении практических задач матрица  $Z$ , как правило, оказывается плохо обусловленной и ее обращение приводит к увеличению погрешности косвенных измерений элементов данной матрицы.

В работе [5] рассмотрен тестовый пример диагностируемой LC-цепи в виде двойного T-образного моста, для которой число обусловленности  $\text{cond} Z$  по спектральной норме равно  $2,5 \cdot 10^4$ . Используя оценку относительной погрешности совокупных измерений элементов  $Y$  в виде

$$\delta Y \leq \delta Z \text{cond} Z (1 - \delta Z \text{cond} Z)^{-1}, \quad (10)$$

где  $\delta Y = \|\Delta Y\| \|Y\|^{-1}$ ,  $\delta Z = \|\Delta Z\| \|Z\|^{-1}$ ,  $\|\cdot\|$  – норма матрицы,  $\Delta Y$  и  $\Delta Z$  – матрицы погрешностей элементов матриц  $Y$  и  $Z$ , можно сделать вывод о том, что при  $\delta Z \geq 4 \cdot 10^{-5}$  задача определения элементов матрицы  $Y$  данной цепи является некорректной, а ее решение потенциально неустойчивым. Если  $\delta Z < 4 \cdot 10^{-5}$ , то решение поставленной задачи становится устойчивым, однако кратность увеличения  $\delta Y$  относительно  $\delta Z$  может превышать значение  $\text{cond} Z = 2,5 \cdot 10^4$  и при приближении  $\delta Z$  к данному значению степень увеличения кратности возрастает.

## 2.2. Циклическое диагностирование

Для регуляризации решения задачи диагностики цепи с помощью преобразования системы координат ее апостериорной макромоделю в [5] предложено приведение  $Y$  к виду матриц с доминирующей главной диагональю путем подключения к узловым парам диагностируемой цепи опорных двухполюсников с известными адмитансами  $Y_{0i}$ , удовлетворяющими условию

$$|Y_{ii} + Y_{0i}| > \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N |Y_{ij}|, i \in \overline{1, N} \quad [4].$$

Так как значения диагональных и недиагональных элементов  $Y_{ii}$  и  $Y_{ij}$  матрицы  $Y$  априорно неизвестны, то для экспериментального определения оптимальных значений  $Y_{0i}$  может быть использован критерий

$$\text{cond } \mathbf{Z}' = \text{cond } \mathbf{Y}' = \min_{Y_{0i}}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{Z}' = (\mathbf{Y}')^{-1}$  и  $\mathbf{Y}' = \mathbf{Y} + \text{diag}(Y_{0i})_{i=1,N}$  – матрицы узловых импедансов и адмитансов цепи с подключенными опорными двухполюсниками.

Поиск оптимальных по критерию (11) значений  $Y_{0i}$  с учетом ограничений на токи узловых пар и число одновременно подключаемых опорных двухполюсников требует проведения многократных измерений элементов различных вариантов матрицы  $\mathbf{Z}'$  с использованием многозначных мер адмитансов и алгоритмов многошаговой оптимизации. Поиск наилучшего варианта  $\mathbf{Z}'$  реализуется с помощью циклического алгоритма, схема которого показана на рис. 1,б. В теле цикла на каждой его итерации формируются априорная модель  $ME_{ij}^b$  эксперимента  $E_{ij}$  и его апостериорная модель  $ME_{ij}^a$ .

Для валидации VA модели  $ME_{ij}^a$  используется условие (11). В случае его выполнения принимается решение об остановке цикла и формировании апостериорной модели цепи  $MC_i^a$ , которая также подвергается процедуре валидации VA с целью проверки ее корректности и адекватности по критериям устойчивости и точности.

Результаты оптимизации  $Y_{0i}$  могут быть получены также с помощью имитационной модели  $k$ -й стадии многократного эксперимента [6, 7], которая заключается в определении элементов матрицы  $\mathbf{Z}'_k$  узловых импедансов при подключении опорного двухполюсника с импедансом  $Y_{0k}$  к  $k$ -й узловой паре:

$$\mathbf{Z}'_k = \mathbf{Z}'_{k-1} - \frac{Y_k}{1 + Y_k \mathbf{e}_k^T \mathbf{Z}'_{k-1} \mathbf{e}_k} \mathbf{Z}'_{k-1} \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T \mathbf{Z}'_{k-1}, \quad (12)$$

где  $\mathbf{Z}'_{k-1}$  – матрица узловых импедансов, элементы которой измеряются на предыдущей стадии эксперимента.

Для реализации описанного способа регуляризации необходимо измерить элементы  $\mathbf{Z}$ , выбрать узловые пары цепи, подключение к которым опорных двухполюсников дает наибольшее уменьшение  $\text{cond } \mathbf{Z}'$  и оптимизировать адмитансы опорных двухполюсников по критерию (11) с помощью имитационного моделирования многократного эксперимента. Далее следует определить элементы матрицы  $\mathbf{Y} = (\mathbf{Z}')^{-1} - \text{diag}(Y_{0i})_{i=1,N}$  по результатам измерений элементов  $\mathbf{Z}'$ .

Рассмотренный алгоритм реализуется с помощью цикла, организованного на информационном уровне  $I$  процесса диагностирования и обозначенного на рис. 1,б прерывистой штриховой линией. Остановка цикла происходит при положительном результате верификации VE имитационной модели  $ME_{ij}^b$  эксперимента.

После остановки цикла оптимизированный вариант модели  $ME_{ij}^b$  используется для планирования эксперимента, по результатам которого формируется его апостериорная модель  $ME_{ij}^a$ . По результату валидации ВА модели  $ME_{ij}^a$  принимается решение о формировании апостериорной модели  $MC_i^a$  цепи или коррекции модели  $ME_{ij}^b$  эксперимента.

Исследование эффективности данного способа на описанном выше тестовом примере показало, что при подключении опорных двухполюсников к трем полюсам цепи число обусловленности  $\text{cond} \mathbf{Z}'$  уменьшается приблизительно в 500 раз, а при подключении ко всем шести полюсам – приблизительно на три порядка. Подобные исследования других тестовых примеров показали, что при увеличении числа полюсов диагностируемой цепи увеличивается и число опорных двухполюсников, подключение которых к узловым парам диагностируемой цепи обеспечивает аналогичное уменьшение  $\text{cond} \mathbf{Z}'$ .

### 2.3. Параллельное диагностирование

Подключение опорных двухполюсников к узловым парам видоизменяет макромодель цепи, если рассматривать ее как элемент модели диагностического эксперимента. При этом размерность макромодели, определяемая числом  $N$  ее координат, не изменяется. Один из путей уменьшения размерности данной модели заключается в выделении определенной группы координат на каждой стадии диагностического эксперимента [8].

Выделение двух координат  $I_i$  и  $I_j$  можно описать с помощью разбиения векторов  $\mathbf{I}$  и  $\mathbf{U}$  на блоки

$$\mathbf{I}_{A(i,j)} = [I_i \ I_j]^T, \quad \mathbf{I}_{B(i,j)} = \begin{bmatrix} I_k \\ \vdots \\ I_j \end{bmatrix}^T \begin{matrix} k \in 1, N \\ k \neq i, j \end{matrix} \quad \text{и} \quad \mathbf{U}_{A(i,j)} = [U_i \ U_j]^T, \quad \mathbf{U}_{B(i,j)} = \begin{bmatrix} U_k \\ \vdots \\ U_j \end{bmatrix}^T \begin{matrix} k \in 1, N \\ k \neq i, j \end{matrix}. \quad (13)$$

Соответствующие данному разбиению блоки  $\mathbf{Y}_{AA(i,j)}$ ,  $\mathbf{Y}_{AB(i,j)}$ ,  $\mathbf{Y}_{BA(i,j)}$ ,  $\mathbf{Y}_{BB(i,j)}$  и  $\mathbf{Z}_{AA(i,j)}$ ,  $\mathbf{Z}_{AB(i,j)}$ ,  $\mathbf{Z}_{BA(i,j)}$ ,  $\mathbf{Z}_{BB(i,j)}$  матриц  $\mathbf{Y}$  и  $\mathbf{Z}$  связаны формулами Фробениуса [4].

При подключении опорных двухполюсников с адмитансами  $Y_{0i}$  и  $Y_{0j}$  к выделенным узловым парам изменяется только один блок  $\mathbf{Y}_{AA(i,j)}$  матрицы  $\mathbf{Y}$  согласно формуле  $\mathbf{Y}'_{AA(i,j)} = \mathbf{Y}_{AA(i,j)} + \text{diag}(Y_i, Y_j)$  и все блоки матрицы  $\mathbf{Z}$ :

$$\mathbf{Z}'_{(i,j)} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}'_{AA(i,j)} & \mathbf{Z}'_{AB(i,j)} \\ \mathbf{Z}'_{BA(i,j)} & \mathbf{Z}'_{BB(i,j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}'_{AA(i,j)} & \mathbf{Y}_{AB(i,j)} \\ \mathbf{Y}_{BA(i,j)} & \mathbf{Y}_{BB(i,j)} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (14)$$

Результаты экспериментов в различных выделенных группах координат в виде элементов матриц  $\mathbf{Z}'_{(i,j)}$  формируют систему линейных алгебраических уравнений

$$Y_{AA(i,j)} - (Z'_{AA(i,j)})^{-1} Z'_{AB(i,j)} Y_{BA(i,j)} = (Z'_{AA(i,j)})^{-1} - \text{diag}(Y_i, Y_j), \quad (15)$$

$i=1, \dots, (N-1)$   
 $j=(i+1), \dots, N$

решение которой в виде элементов матрицы  $Y$  возможно, если блоки  $Z'_{AA(i,j)}$  для всех вариантов выделения групп координат являются невырожденными.

Схема алгоритма диагностирования в выделенных группах координат показана на рис. 2. На схеме не показаны блоки формирования модели  $MC^b$  цепи в полной системе координат по результатам предварительного эксперимента, а также блоки верификации и валидации априорных и апостериорных моделей.

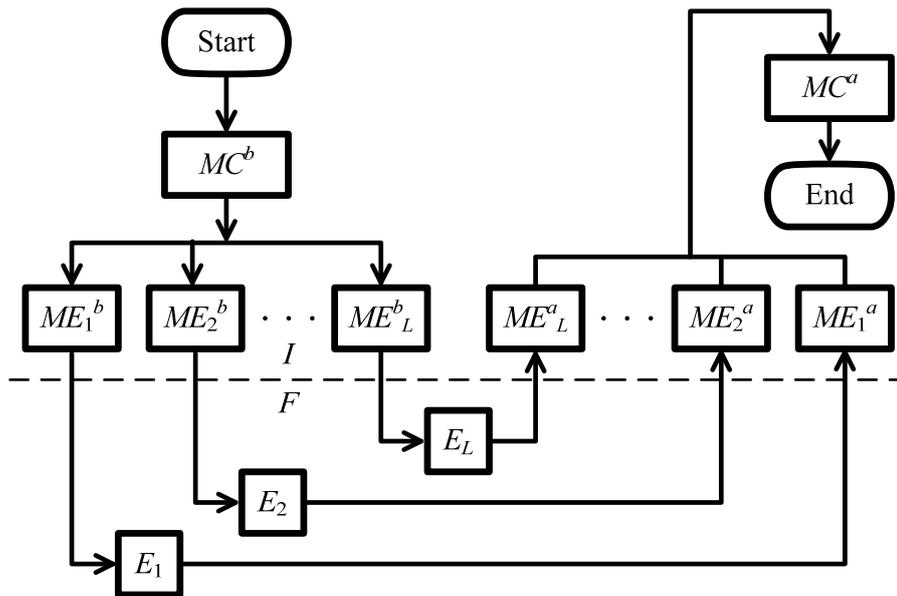


Рис. 2. Схемы параллельного алгоритма диагностики

Формирование априорных и апостериорных моделей  $ME_l^b$  и  $ME_l^a$  экспериментов  $E_l$ , где  $l \in \overline{1, L}$ , осуществляются в данных алгоритмах параллельно, так как результаты эксперимента в определенной группе координат не зависят от результатов экспериментов в других группах.

Использование параллельного алгоритма диагностики по результатам экспериментов в пятнадцати парах координат тестового примера цепи LC-фильтра позволило получить число обусловленности матрицы коэффициентов системы (15), равное 1,7. Если относительная погрешность косвенных измерений узловых импедансов не превышает  $10^{-3}$ , то относительная погрешность совокупных измерений узловых адмитансов при достигнутой степени обусловленности решаемой системы (15) не превышает  $2 \cdot 10^{-3}$ .

Параллельные алгоритмы могут быть использованы также для построения апостериорной модели выбранного уровня по результатам экспериментов на нескольких уровнях, в число которых может входить и уровень формируемой модели. Совокупная обработка результатов, полученных преобразова-

нием апостериорных моделей различных уровней, обеспечивает более полное и достоверное диагностирование, а степень согласованности получаемых результатов может служить критерием адекватности формируемой апостериорной модели цепи.

### **Заключение**

Рассмотренные примеры построения алгоритмических моделей процессов диагностики электрических цепей показывают, что предложенный подход к решению задач экспериментального определения состояний объектов диагностики на основе результатов их многоуровневого моделирования может служить эффективным инструментом для совершенствования существующих и разработки новых методов и средств диагностики.

### **Библиографический список**

1. **Демирчан, К. С.** Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – Т. 2. – 576 с.
2. **Куроедов, С. К.** Использование технологии виртуальных приборов для решения задач диагностики электрических цепей методом узловых импедансов / С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments NIDays-2014 : сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 19–20 ноября 2014 г.). – Москва : ДМК Пресс, 2014. – С. 12–14.
3. **Байдаров, С. Ю.** Использование технологии виртуальных приборов для определения частотных характеристик элементов и систем управления / С. Ю. Байдаров, М. М. Бутаев, С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 105–115.
4. **Воеводин, В. В.** Матрицы и вычисления / В. В. Воеводин, Ю. А. Кузнецов. – Москва : Наука, 1984. – 320 с.
5. **Куроедов, С. К.** Алгоритмы диагностики электрических цепей методами узловых адмитансов и импедансов / С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 52–57.
6. **Куроедов, С. К.** Инструментальная регуляризация решения задачи диагностики электрических цепей методом узловых импедансов / С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 50–54.
7. **Князьков, А. В.** Виртуальная диагностика электрических цепей с коррекцией погрешностей совокупных измерений узловых адмитансов / А. В. Князьков, С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments NIDays-2016 : сб. тр. XV Междунар. конф. (Москва, 25 ноября 2016 г.). – Москва : ДМК Пресс, 2016. – С. 151–153.
8. **Куроедов, С. К.** Регуляризация решения задачи диагностики электрических цепей по результатам измерений узловых импедансов в выделенных группах координат / С. К. Куроедов, А. В. Светлов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 144–147.

### **References**

1. Demirchan K. S., Neyman L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical essentials of electrical engineering]. Saint-Petersburg: Piter, 2003, vol. 2, 576 p. [In Russian]
2. Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologiiy National Instruments NIDays-2014: sb. tr. XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*

- (Moskva, 19–20 noyabrya 2014 g.) [Engineering and scientific applications on the basis of National Instruments NIDays-2014: proceedings of XIII International scientific and practical conference (Moscow, November 19<sup>th</sup>–20<sup>th</sup>, 2014)]. Moscow: DMK Press, 2014, pp. 12–14. [In Russian]
3. Baydarov S. Yu., Butaev M. M., Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 1 (21), pp. 105–115. [In Russian]
  4. Voevodin V. V., Kuznetsov Yu. A. *Matritsy i vychisleniya* [Matrixes and computations]. Moscow: Nauka, 1984, 320 p. [In Russian]
  5. Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2014, vol. 2, pp. 52–57. [In Russian]
  6. Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 50–54. [In Russian]
  7. Knyaz'kov A. V., Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologii National Instruments NIDays-2016: sb. tr. XV Mezhdunar. konf. (Moskva, 25 noyabrya 2016 g.)* [Engineering and scientific applications on the basis of National Instruments NIDays-2016: proceedings of XV International scientific and practical conference (Moscow, November 25<sup>th</sup>, 2014)]. Moscow: DMK Press, 2016, pp. 151–153. [In Russian]
  8. Kuroedov S. K., Svetlov A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of an International symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 144–147. [In Russian]

---

**Куроедов Сергей Константинович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Kuroedov Sergey Konstantinovich**

Candidate of engineering sciences,  
associate professor, sub-department of radio  
engineering and radio electronic systems,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Светлов Анатолий Вильевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Svetlov Anatoliy Vil'evich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of radio  
engineering and radio electronic systems,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Смогунов Владимир Васильевич**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра теоретической и прикладной  
механики и графики, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Vladimir.smogunov@mail.ru

**Smogunov Vladimir Vasil'evich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of theoretical and applied  
mechanics and graphics,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

**Чураков Петр Павлович**

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

E-mail: iit@pnzgu.ru

**Churakov Petr Pavlovich**

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

---

**Образец цитирования:**

Куроедов, С. К. Диагностические модели электрических цепей с сосредоточенными параметрами / С. К. Куроедов, А. В. Светлов, В. В. Смогунов, П. П. Чураков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 63–76. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-5.

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМЫ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Объектом исследования является система управления перемещением мобильных роботов. Предмет исследования – методы поиска оптимального пути и алгоритм следования мобильного робота по построенному пути с применением абсолютной системы навигации. Целью работы является разработка алгоритма управления, позволяющего данной системе повысить точность по сравнению с системой, использующей относительную систему позиционирования.

*Материалы и методы.* Исследование проводилось с использованием среды Matlab, физической модели мобильного робота, ультразвуковой навигационной системы, а также методов поиска оптимального пути.

*Результаты.* Предложен алгоритм управления мобильной платформой, позволяющий минимизировать погрешность позиционирования в заданной точке.

*Выводы.* Предложенные состав системы и алгоритм управления позволяют повысить точность позиционирования мобильного робота по сравнению с относительными системами позиционирования.

**Ключевые слова:** алгоритмы, навигация, оптимальный путь, мобильный робот.

S. V. Boryak

## A MOBILE ROBOT MOVEMENT CONTROL SYSTEM IN ENCLOSED SPACE BASED ON THE ULTRASONIC SYSTEM DATA

### Abstract.

*Background.* The research object is a system for controlling the movement of mobile robots. The research subject is the methods for finding the optimal path and an algorithm for following a mobile robot along a constructed path using an absolute navigation system. The aim of the work is to develop a control algorithm that allows this system to increase accuracy compared to a system using a relative positioning system

*Materials and methods.* The study was conducted using the Matlab environment, a physical model of a mobile robot, an ultrasonic navigation system, and optimal path searching methods.

*Results.* A mobile platform control algorithm has been proposed to minimize positioning error at a given point.

*Conclusions.* The proposed system composition and control algorithm can improve the accuracy of mobile robot positioning compared to relative positioning systems.

**Keywords:** algorithms, navigation, optimal path, mobile robot.

### **Введение**

Сейчас повсеместно внедряется автоматизация [1], многие компании разрабатывают системы автопилотов для машин, ориентированные на закрытые или открытые помещения. Для открытых пространств базовой системой является GPS, для закрытых используются различные системы, но наибольшим потенциалом обладает ультразвуковая навигационная система (УЗС), работающая по принципу GPS, но в закрытых помещениях и с погрешностью в пределах 3 см. В данной статье описывается опыт в построении системы управления мобильным роботом на основе ультразвуковой системы отслеживания координат.

### **1. Аппаратные и программные средства**

Для того чтобы робот переместился из текущей точки позиционирования в заданную, ему необходим ряд математических и технических средств. Исполнительным механизмом данного робота является пара шаговых двигателей 17HS4401. Данные шаговые двигатели имеют шаг углового поворота 1,8 гр, номинальный ток 1,7 А, крутящий момент при удержании 40 Н/см. У них две управляющих обмотки, что позволяет управлять этими двигателями простыми драйверами, также при помощи программных методов можно изменить шаг двигателей, подавая не стандартные импульсы, а сигнал синусоидальной формы, именно такой сигнал применялся для управления двигателями в данном проекте.

В качестве сенсоров используется ультразвуковая навигационная система с точностью определения координат  $\pm 2$  см и частотой обновления 2 раза в секунду. Навигационная система предоставляет координаты в двумерном пространстве. Данная система описана в статье [2].

Для определения угла поворота мобильной платформы (МП) относительно стартового состояния используется датчик BNO080 [3]. Данный датчик является представителем интеллектуальных датчиков фирмы Bosch. В датчик интегрирован контроллер Cortex M0, который служит высокопроизводительным вычислительным ядром, в качестве сенсоров выступают магнитометр, акселерометр и гироскоп. Датчик имеет следующие основные характеристики: ошибка земного магнитного вектора 4,5 гр, ошибка гравитационного вектора 1,5 гр, точность измерения ускорения  $0,3 \text{ м/с}^2$ , максимальная частота выходных данных 1 кГц. Данная линейка датчиков ориентирована на применение в роботах. Также благодаря использованию контроллера с энергонезависимой памятью данный датчик не только производит автокалибровку, что до недавнего времени приходилось делать пользователю, но и хранит у себя в памяти все калибровочные значения, в серии BNO055 эта функция отсутствовала. Несмотря на все его преимущества, в ходе испытаний было обнаружено, что установленный в датчике магнитометр обладает высокой чувствительностью ко всем типам металлов, поэтому использование магнитометра в жилых или рабочих помещениях нецелесообразно [4].

Помимо аппаратных средств потребуются алгоритмы для поиска пути в заданном помещении и для следования по этому пути. В качестве метода поиска пути используется вероятностный метод поиска пути Probabilistic Roadmaps Method (PRM), подробно описанный в [5–7]. Отличительной особенностью данного метода по сравнению с детерминированными является то, что он не рассчитывает путь через все точки поля, а случайно расставляет узлы графа на свободные участки рабочей области, а затем через них прокладывает кратчайший путь, учитывая все ограничения. Преимуществом данного метода является скорость работы, которую можно регулировать при помощи изменения количества расставляемых точек графа и максимального расстояния между ними. Чем меньше эти значения, тем быстрее строится карта и прокладывается маршрут, но тем меньше вероятность оптимальности этого маршрута. Данное значение предлагается искать автоматически, путем запуска алгоритма с минимальным количеством вершин графа и последующим их увеличением до тех пор, пока маршрут не удастся построить. Но эксперименты показали, что маршрут, построенный таким образом, чаще всего не является оптимальным, поэтому количество вершин графа в данном исследовании устанавливается вручную для конкретной карты в зависимости от ее сложности, ведь один раз назначив данное количество для конкретной карты, его не следует больше менять.

Также были рассмотрены другие методы поиска пути, протестирован метод Rapidly Exploring Random Trees, а также детерминированные методы из курса «Robotics: Computational Motion Planning» [8]. Данные методы показали не такие хорошие результаты. Поскольку рабочая область составляет 500 на 400 ячеек, то недопустимо медленно заполнять ей все ячейки, что сразу убирает детерминированные методы, а так как надо будет иногда править путь мобильного робота, не достигнув конечной точки, либо после достижения данной точки продолжать работу, то необходимо, чтобы построение нового маршрута на старой карте не сопровождалось перестройкой всего графа так как это является самой ресурсной операцией. Метод Rapidly Exploring Random Trees не удовлетворяет данному требованию. Всем требованиям лучше всего удовлетворяет метод (PRM).

Структурная схема системы управления МП представлена на рис. 1. В структуре данной системы присутствуют две обратных связи, одна внутренняя в мобильной платформе основанная на датчике BNO080, вторая внешняя, основанная на УЗС.

## 2. Планирование траектории движения

Для нахождения оптимального пути необходимо выполнить следующую последовательность действий:

1. Составить карту рабочей области вместе с препятствиями, изображение должно быть черно-белым, где черное обозначает закрытые места, а белое – открытые, на рис. 2 черным представлены закрытые места.

2. Отмасштабировать изображение, на этом шаге важно учесть минимальный размер препятствия или мобильного робота, в зависимости от того, что меньше. В данном случае принимаем масштаб: 1 ячейка матрицы к 10 мм; чем больше масштаб, тем более ресурсоемким будет построение пути, но в то же время более гибким.

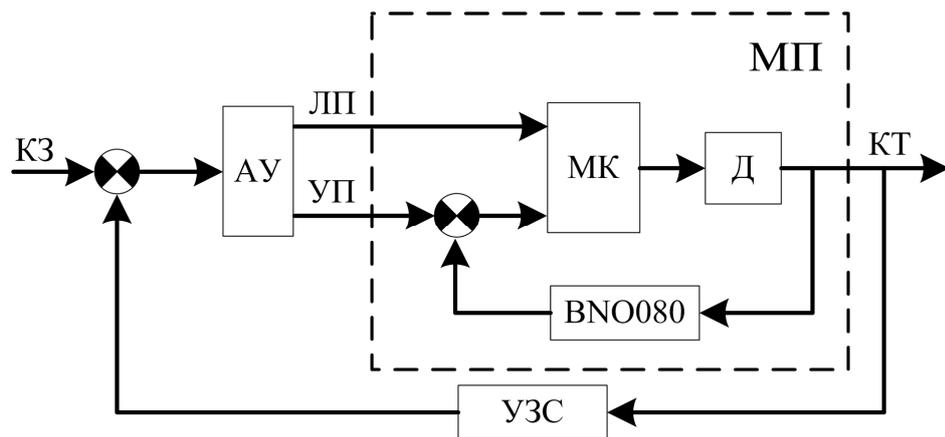


Рис. 1. Структурная схема системы управления мобильной платформой: КЗ – координаты заданные; АУ – алгоритм управления; ЛП – линейное перемещение; УП – угловое перемещение; МК – микроконтроллер; Д – двигатели; КТ – координаты текущие; УЗС – ультразвуковая система

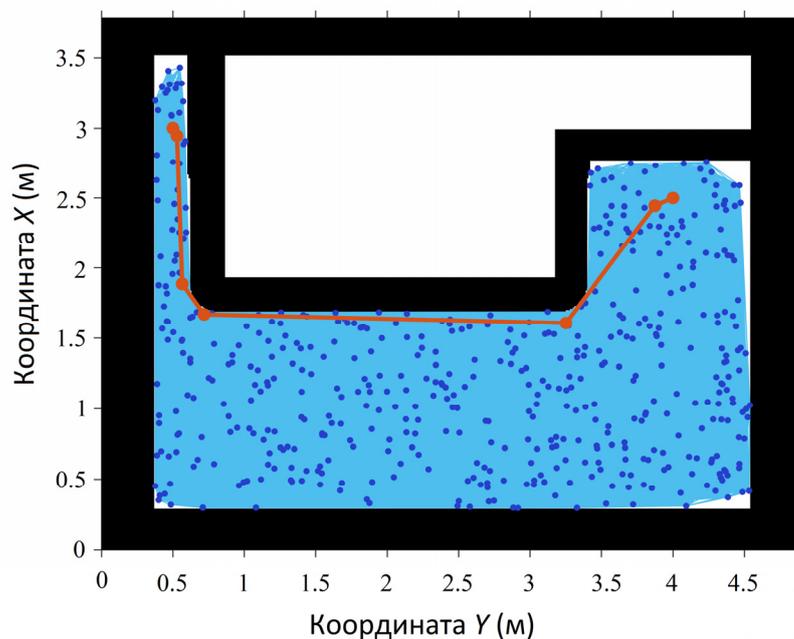


Рис. 2. PRM рабочей зоны с траекторией движения

3. Преобразовать получившееся изображение в двумерный логический массив.

4. «Раздуть» все объекты карты (в том числе и стены) на значение, равное сумме радиуса платформы и погрешности позиционирования.

5. Установить количество вершин графа (синие точки на рис. 2) и максимальное расстояние между ними (голубые линии на рис. 2). Далее в статье будет рассматриваться, как влияют на точность позиционирования робота большие расстояния между вершинами графа.

6. Применить алгоритм поиска оптимального пути (PRM).

7. Если путь не был найден или результат не удовлетворителен, то необходимо вернуться к пункту 5 и увеличить число вершин графа или расстояние между ними.

При первом построении маршрута рекомендуется повторить пункт 6 несколько раз, чтобы убедиться, что алгоритм с подобранными настройками стабильно выдает удовлетворительные результаты. Так как метод вероятностный, то при повторном выполнении он может выдавать различные варианты пути, и необходимо убедиться, что программа стабильно выдает удовлетворяющую условиям траекторию.

В результате проделанной работы был получен путь, представленный на рис. 2 сплошной оранжевой линией, для заданной рабочей области и мобильного робота с радиусом в 15 см.

Получившийся путь визуально оптимален, а так как число вершин графа равно 500, то и ресурсоемкость расчетов невелика по сравнению с  $500 \times 400$ , как необходимо считать в детерминированном подходе.

### 3. Следование по спланированному пути

Теперь составим алгоритм, который проведет мобильную платформу по полученному пути.

Главный алгоритм управления запускается в среде Matlab, он управляет мобильной платформой, которая принимает и выполняет три команды: перемещение, поворот и коррекция угла.

Главный алгоритм представлен на рис. 3.

### 4. Тестирование разработанных алгоритмов на физической модели

Протестируем данный алгоритм без коррекции по УЗС. Мобильная платформа будет перемещаться без обратной связи, только считая импульсы на шаговых двигателях и получая угол поворота с BNO080. Мобильная платформа будет перемещаться по прямоугольнику с размерами 1500 мм вдоль оси  $X$  и 2000 мм вдоль оси  $Y$ . Для отслеживания мобильной платформы в ходе движения используется УЗС. Мобильная платформа проедет 5 раз полный прямоугольник. В результате данного эксперимента была получена траектория движения, представленная на рис. 4 голубой линией.

На рис. 4 видно, что прямоугольная траектория каждого проезда поворачивается на определенный угол, что создает существенные ошибки в позиционировании, в то время как линейная ошибка перемещения не имеет существенной погрешности. Угловая ошибка накапливается в датчике BNO080, в мобильной платформе она лишь проявляется, что лишний раз доказывает необходимость использовать абсолютные системы позиционирования для коррекции ошибок, накапливающихся в относительных.

Теперь введем коррекцию ошибки угла и координат. В результате была получена траектория движения, представленная на рис. 5.

Угловая и линейная ошибки представлены на рис. 6 и 7 соответственно; в случае системы без коррекции – пунктирная линия, с коррекцией – сплошная линия.

Из экспериментальных данных следует, что система с коррекцией тоже имеет ошибку, но, в отличие от системы без коррекции, здесь ошибка не возрастает со временем, она всегда находится в одних и тех же пределах.

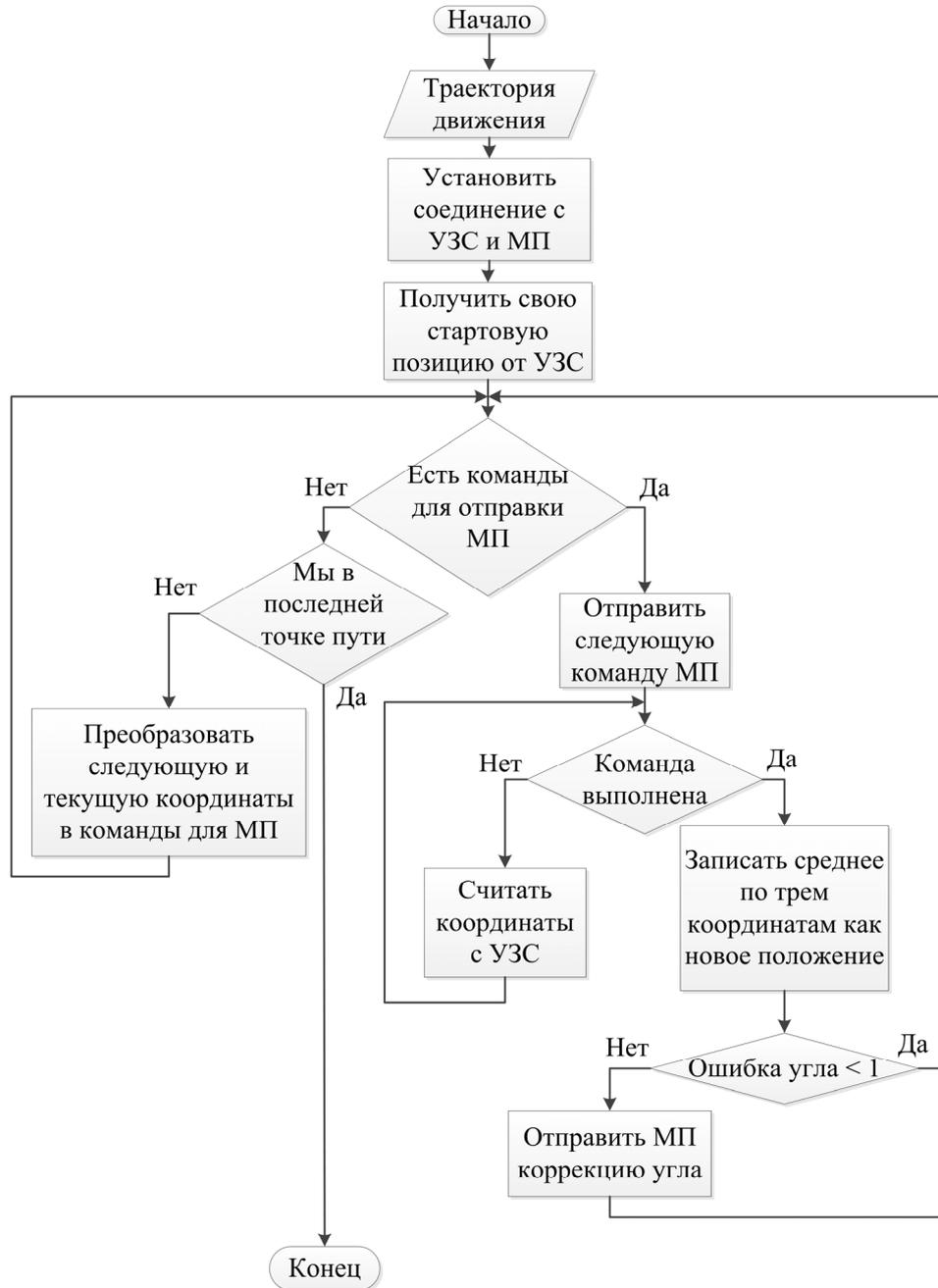


Рис. 3. Главный алгоритм управления МП

Теперь соединим систему построения маршрута с системой перемещения мобильного робота. Траектория движения показана на рис. 8. Сплошной линией изображена рассчитанная траектория, точками показан маршрут МП.

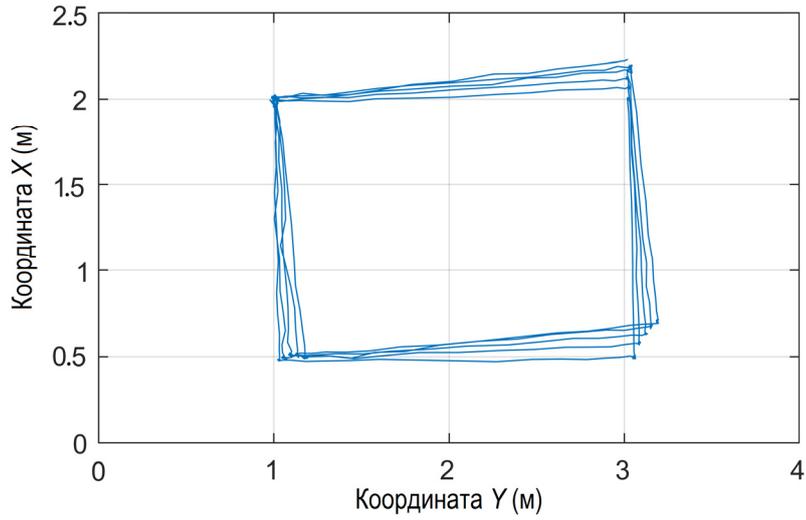


Рис. 4. Траектория движения без коррекции

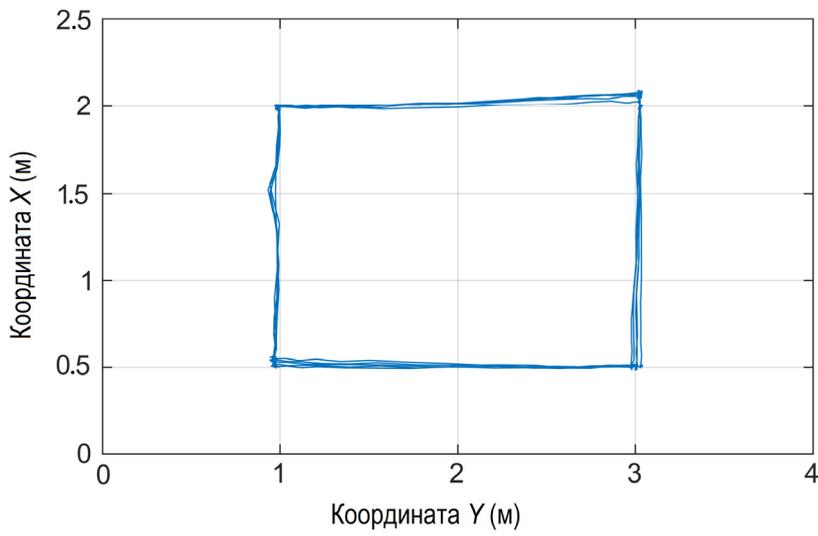


Рис. 5. Траектория движения с коррекцией

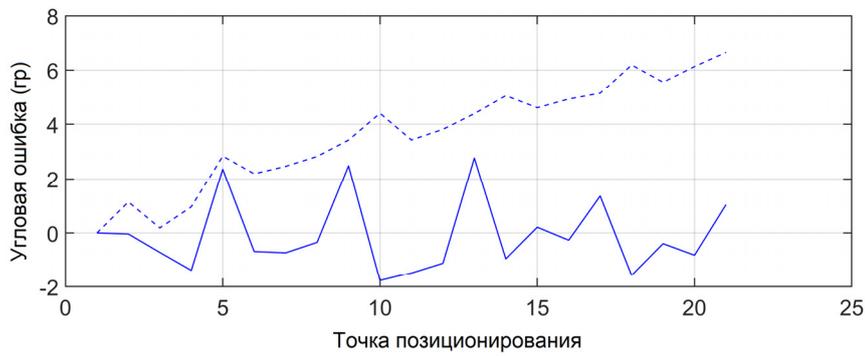


Рис. 6. Угловая ошибка

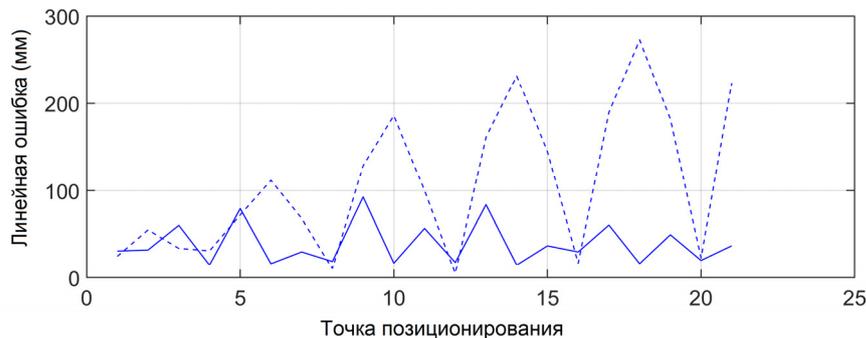


Рис. 7. Линейная ошибка

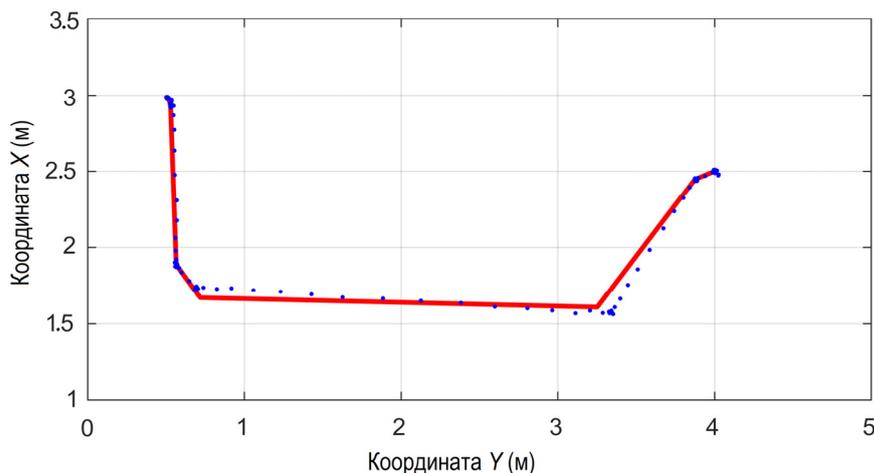


Рис. 8. Траектория движения в заданную позицию

Ошибка позиционирования в конечной точке составляет 19 мм, что достаточно мало по сравнению с другими видами систем позиционирования. Данная точность получилась вследствие того, что конечный отрезок пути был достаточно мал. Как было показано ранее, самую большую ошибку позиционирования создает ошибка угла, и чем больше отрезок пути, тем больше влияние ошибки угла на ошибку позиционирования. В том случае, если последний отрезок пути велик, необходимо задать двойной проезд в конечную точку, таким образом, он повторным проездом скомпенсирует появившуюся ошибку до пределов 20 мм.

### Заключение

В результате проведенных экспериментов было опытным путем доказано, что абсолютная система позиционирования лучше подходит для навигации мобильных роботов, чем относительная, так как в относительной системе позиционирования максимальная линейная ошибка достигла 280 мм, а угловая 7 гр, и они продолжали линейно возрастать. В то время как в системе с использованием абсолютной навигационной системы УЗС максимальная линейная ошибка достигла 90 мм а угловая 5 гр, и эти ошибки не имеют тенденции к росту с течением времени.

**Библиографический список**

1. Аналитический обзор мирового рынка робототехники 2019, Sberbank Robotics Laboratory // sberbank.ru. – URL: [http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank\\_robotics\\_review\\_2019\\_17.07.2019\\_m.pdf](http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf) (дата обращения: 07.10.2019).
2. Ультразвуковой GPS // habr.com. – URL: <https://habr.com/ru/post/451408/> (дата обращения: 07.10.2019).
3. BNO080/BNO085 Datasheet // hillcrestlabs.com. – URL: <https://www.hillcrestlabs.com/downloads/bno080-datasheet> (дата обращения: 07.10.2019).
4. BNO055 Handing, soldering & mounting instruction // bosch.com. – URL: [https://ae-bst.resource.bosch.com/media/\\_tech/media/application\\_notes/BST-BNO055-HS000.pdf](https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/application_notes/BST-BNO055-HS000.pdf) (дата обращения: 07.10.2019).
5. Probabilistic Roadmaps (PRM) // mathworks.com. – URL: <https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/probabilistic-roadmaps-prm.html> (дата обращения: 07.10.2019).
6. Path Planning in Environments of Different Complexity // mathworks.com. – URL: <https://www.mathworks.com/help/robotics/examples/path-planning-in-environments-of-difference-complexity.html> (дата обращения: 07.10.2019).
7. **Kavraki, L. E.** Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces / L. E. Kavraki // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1996. – Vol. 12, № 4. – P. 566–580.
8. Robotics: Computational Motion Planning // coursera.org. – URL: <https://ru.coursera.org/lecture/robotics-motion-planning/1-1-introduction-to-computational-motion-planning-hE9C7> (дата обращения: 07.10.2019).

**References**

1. *Analiticheskiy obzor mirovogo rynka robototekhniki 2019, Sberbank Robotics Laboratory* [An analytical review of the world robotics market in 2019, Sberbank Robotics Laboratory]. sberbank.ru. Available at: [http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank\\_robotics\\_review\\_2019\\_17.07.2019\\_m.pdf](http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf) (accessed Oct. 07, 2019). [In Russian]
2. *Ul'trazvukovoy GPS* [Ultrasound GPS]. habr.com. Available at: <https://habr.com/ru/post/451408/> (accessed Oct. 07, 2019). [In Russian]
3. *BNO080/BNO085 Datasheet*. hillcrestlabs.com. Available at: <https://www.hillcrestlabs.com/downloads/bno080-datasheet> (accessed Oct. 07, 2019).
4. *BNO055 Handing, soldering & mounting instruction*. bosch.com. Available at: [https://ae-bst.resource.bosch.com/media/\\_tech/media/application\\_notes/BST-BNO055-HS000.pdf](https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/application_notes/BST-BNO055-HS000.pdf) (accessed Oct. 07, 2019).
5. *Probabilistic Roadmaps (PRM)*. mathworks.com. Available at: <https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/probabilistic-roadmaps-prm.html> (accessed Oct. 07, 2019).
6. *Path Planning in Environments of Different Complexity*. mathworks.com. Available at: <https://www.mathworks.com/help/robotics/examples/path-planning-in-environments-of-difference-complexity.html> (accessed Oct. 07, 2019).
7. Kavraki L. E. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1996, vol. 12, no. 4, pp. 566–580.
8. *Robotics: Computational Motion Planning*. coursera.org. Available at: <https://ru.coursera.org/lecture/robotics-motion-planning/1-1-introduction-to-computational-motion-planning-hE9C7> (accessed Oct. 07, 2019).

***Боряк Сергей Васильевич***

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

E-mail: boosoov@gmail.com

***Boryak Sergey Vasil'evich***

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

---

**Образец цитирования:**

Боряк, С. В. Система управления перемещением мобильного робота в закрытых помещениях на основе данных ультразвуковой системы / С. В. Борьяк // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 77–86. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-6.

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЛОКАЦИИ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

### Аннотация

*Актуальность и цели.* Рассмотрены принципы построения системы управления мобильным роботом на основе ультразвуковой системы (УЗС) отслеживания координат, а также методы цифровой обработки сигналов для обнаружения и выделения частотных составляющих. Целью работы является обоснование, выбор и совершенствование существующих алгоритмов обработки сигналов для локации объектов.

*Материалы и методы.* Исследование проводилось с использованием среды Matlab, физической модели мобильного робота, ультразвуковой навигационной системы.

*Результаты.* Сопоставлены инверсные системы, в которых приемники стационарны, а излучатели мобильны, с неинверсными системами, в которых излучатели стационарны, а приемники мобильны. Обоснованы методы цифровой обработки сигналов для задач локации объекта – спектрального, корреляционного и параметрического анализа.

*Выводы.* Предложенные решения позволяют повысить точность позиционирования мобильного робота по сравнению с относительными системами позиционирования. Обосновано применение алгоритмов Прони и Рутисхаузера для выделения близких частотных составляющих, проведено их сравнение.

**Ключевые слова:** алгоритмы, навигация, мобильный робот, параметрический анализ, метод Прони, метод Рутисхаузера.

N. V. Myasnikova, S. V. Boryak, M. G. Myasnikova

## SIGNAL PROCESSING IN ULTRASONIC OBJECT'S COORDINATE TRACKING SYSTEMS FOR ENCLOSED SPACES

### Abstract.

*Background.* The principles of building a mobile robot control system based on an ultrasonic coordinate tracking system (USS), as well as methods of digital signal processing for detecting and isolating frequency components are considered. The purpose of this work is to substantiate, select and improve existing signal processing algorithms for object location.

*Materials and methods.* The research was carried out using the Matlab environment, a physical model of a mobile robot, and an ultrasonic navigation system.

*Results.* Inverse systems having stationary receivers and mobile emitters are compared with non-inverse systems in which the emitters are stationary and the receivers are mobile. The methods of digital signal processing – spectral, correlation, and parametric analysis - have been studied.

*Conclusions.* The proposed solutions make it possible to improve the positioning accuracy of the mobile robot in comparison with relative positioning systems. The application of the Proni and Rutishauser algorithms for identifying close frequency components is justified, and their comparison is carried out.

**Keywords:** algorithms, navigation, mobile robot, para-metric analysis, Prony method, the method of Rutishauser.

### **Введение**

Сейчас повсеместно внедряется автоматизация [1], многие компании разрабатывают системы автопилотов для машин, ориентированные на закрытые или открытые помещения. Для закрытых помещений наиболее часто используется ультразвуковая навигационная система, работающая по принципу GPS [2], но только в закрытых помещениях и с погрешностью в пределах 3 см. В данной статье мы опишем: свой опыт в построении системы управления мобильным роботом на основе ультразвуковой системы (УЗС) отслеживания координат; способы цифровой обработки сигналов для обнаружения и выделения частотных составляющих.

### **Принципы построения систем**

Существует множество вариаций данных систем, но все они делятся на две большие группы, инверсные и неинверсные. Структурная схема инверсной системы представлена на рис. 1, а неинверсной системы – на рис. 3 [3].

Структурная схема инверсной системы следующая: установлены 4 приемника ультразвукового сигнала (УЗ)  $R_1...R_4$ , и несколько излучателей УЗ-сигнала  $T_1...T_3$ , в данном случае 3. Приемники стационарны, излучатели мобильны. Применяется временное разделение излучателей. Физика звука такова, что мы можем делать только 10 измерений УЗ в секунду, это вызвано тем, что звук медленно распространяется, вследствие чего определение координат одного объекта происходит с частотой 10 Гц, если же необходимо отслеживать 10 объектов, то частота определения координат каждого из них 1 Гц. На рис. 1 изображено отслеживание координат  $T_3$ .

При каждом цикле измерения координат на каждом приемнике  $R$  мы имеем сигналы, изображенные на рис. 2.

В данных сигналах выделяется область прихода информативного сигнала и рассчитывается время, на основании которого определяются длины  $L_{3_1}, L_{3_2}, L_{3_3}, L_{3_4}$ .

В неинверсной системе обратная архитектура. Излучатели ( $T$ ) стационарны, а приемники ( $R$ ) мобильны, и при временном разделении сигнала получается система с неограниченно растущим числом отслеживаемых объектов, при этом не изменяется частота определения их координат. Но по времени здесь разделены стационарные модули, которые являются излучателями УЗ-сигнала, вследствие чего возникают две проблемы: с ростом площади покрытия и, соответственно, числа стационарных модулей уменьшается частота обновления координат всех отслеживаемых объектов. Из-за того что излучатели разделены по времени и работают обычно с задержкой в 100 мкс, а отслеживаемые объекты в этот момент перемещаются, появляется ошибка прямо пропорциональная скорости отслеживаемых объектов.

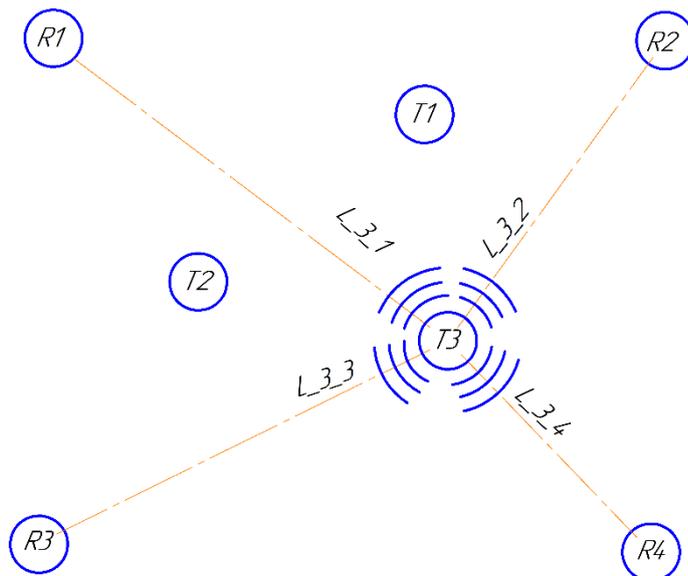


Рис. 1. Структурная схема инверсной системы

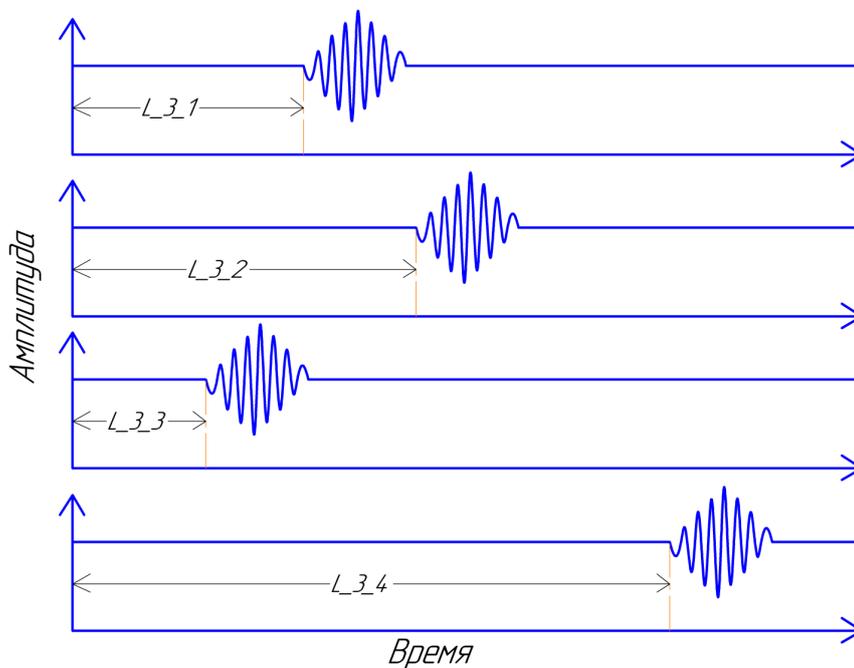


Рис. 2. Сигналы, получаемые приемниками в инверсной системе

Из вышесказанного следует вывод, что главная проблема – это временное разделение сигналов. Альтернативой выступает частотное разделение сигналов, которое может применяться в обеих конфигурациях, описанных выше [4].

Здесь ограничение накладывается числом рабочих частот. Обычно рабочий диапазон для излучателя SensComp 600 от 44 до 65 кГц. Этот диапазон можно расширить до значений до 120 кГц, но тогда придется использовать

отдельный пьезокерамический диск для каждой частоты, так как указанные излучатели эффективны только на своей резонансной частоте, которая определена его физическими свойствами. Микрофоны же имеют широкий диапазон частот и поэтому не накладывают на систему таких ограничений. Также необходимо учитывать, что пьезокерамические диски обычно выпускаются с шагом резонансной частоты в 20 кГц, так что мы имеем шесть рабочих частот.

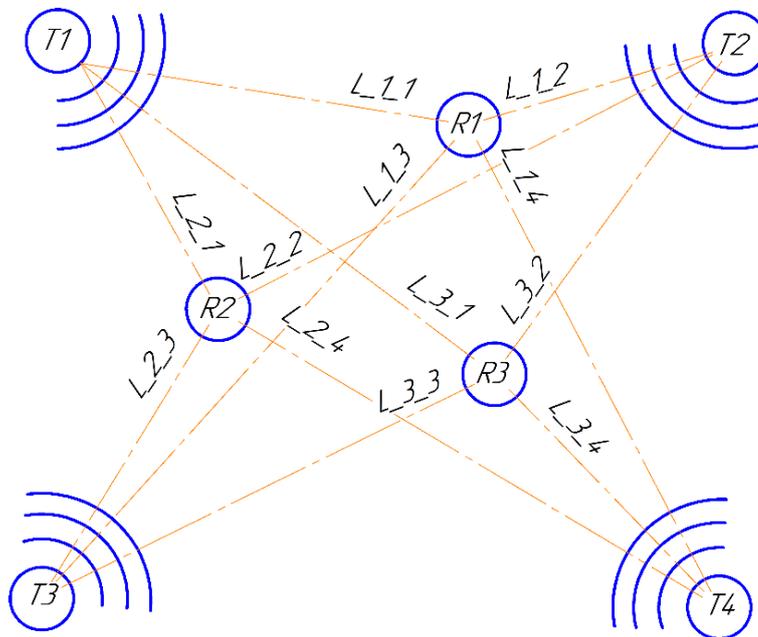


Рис. 3. Структурная схема неинверсной системы

Данный подход наиболее эффективен при неинверсной системе. Стационарные модули располагаются на расстоянии в несколько метров и это жестко детерминировано, в то время как мобильные модули постоянно перемещаются и могут быть собраны в одну группу, вследствие чего использовать неинверсную систему более эффективно в подавляющем большинстве случаев. Структурная схема неинверсной системы с частотным разделением представлена на рис. 3. Излучатели T1, T2, T3 и T4 излучают в одно и то же время на разных частотах, а приемники R1, R2 и R3 одновременно слушают эфир и записывают сигналы, представленные на рис. 4.

Выделение частотных составляющих и детектирование их начала является большой проблемой, особенно если несколько сигналов накладывается друг на друга.

Очевидно, при этом следует решить две задачи: определить частотный состав и найти «начало» отклика на каждой частоте.

Первая задача классическая для спектрального анализа. Наиболее известный алгоритм – дискретное преобразование Фурье (ДПФ) – не может дать решения задачи по двум причинам:

– это преобразование довольно затратное ( $N^2$  операций умножения для реализации длиной  $N$  при классическом ДПФ или  $N \log(N)$  при использовании быстрого преобразования);

– разрешение зависит от интервала анализа  $T$ , поэтому для обнаружения и разделения близких частотных составляющих требуется длинная реализация, что несовместимо с обработкой в режиме реального времени.

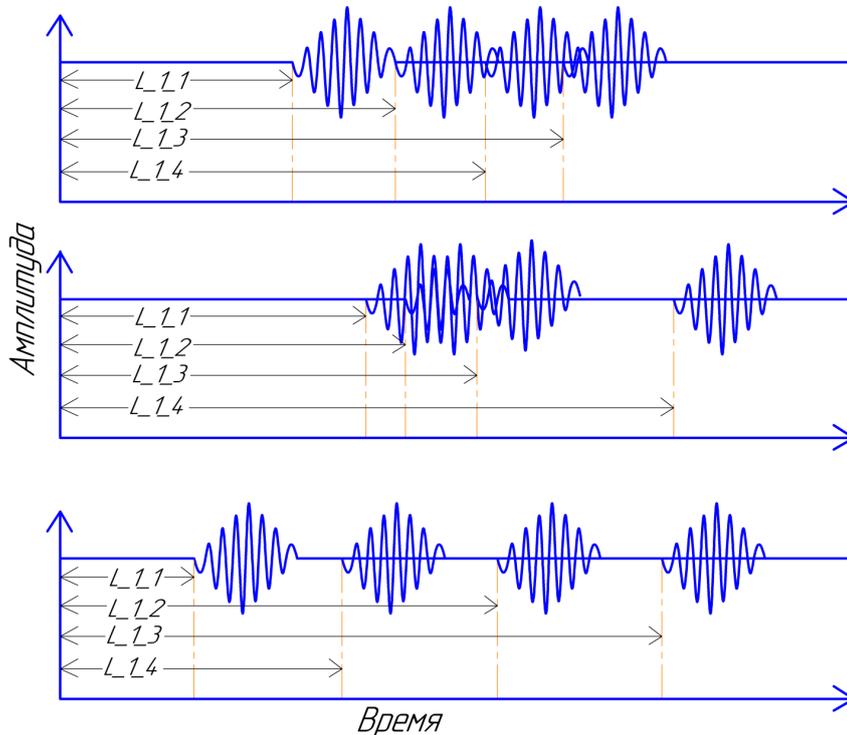


Рис. 4. Сигналы, получаемые приемниками в неинверсной системе

Бликие частотные составляющие могут быть выделены по короткой реализации данных с помощью параметрических методов спектрального анализа – метод Юла – Уолкера, метод Писаренко, метод Прони и др.

Для определения параметров компонент сигналов сложной формы наиболее подходящими являются методы Прони [5] и частных и разностей Рутисхаузера (QD-алгоритм) [6]. На рис. 5 приведена диаграмма Бode для модельного сигнала из трех близких составляющих, близких частотных составляющих 17.7000, 18.000 и 18.3030 кГц с одинаковыми амплитудами, при этом шаг дискретизации  $dt = 0,01$  с. При этом методом Рутисхаузера были выделены частоты 18.2993, 17.7000 и 17.9901 кГц, а методом Прони 18.3604, 17.9526 и 17.6879. Метод Рутисхаузера позволяет выделять и более близкие компоненты, отличающиеся на тысячные доли, и обладает более низкой трудоемкостью по сравнению с методами на основе авторегрессионных моделей.

Чтобы объяснить этот факт, очень кратко изложим оба алгоритма.

Рассмотрим сначала метод Прони [5]. Он основан на согласовании кривой, содержащей  $p$  экспоненциальных членов с результатами измерений. Предполагается, что аппроксимирующая функция принимает форму,

$$\hat{x}(t) = \sum_{m=1}^p A_m e^{\alpha_m |t|} e^{j(2\pi f_m t + \theta_m)}, \quad (1)$$

причем функция определена при  $-\infty < t < \infty$ . Вещественный процесс моделируется комплексно-сопряженной парой  $e^{j(2\pi f_m t + \theta_m)}$  и  $e^{-j(2\pi f_m t + \theta_m)}$ . Здесь  $p$  – порядок модели;  $A_m$ ,  $\alpha_m$ ,  $f_m$ ,  $\theta_m$  – параметры колебательного звена (амплитуда собственных колебаний, коэффициент затухания, собственная частота и запаздывание).

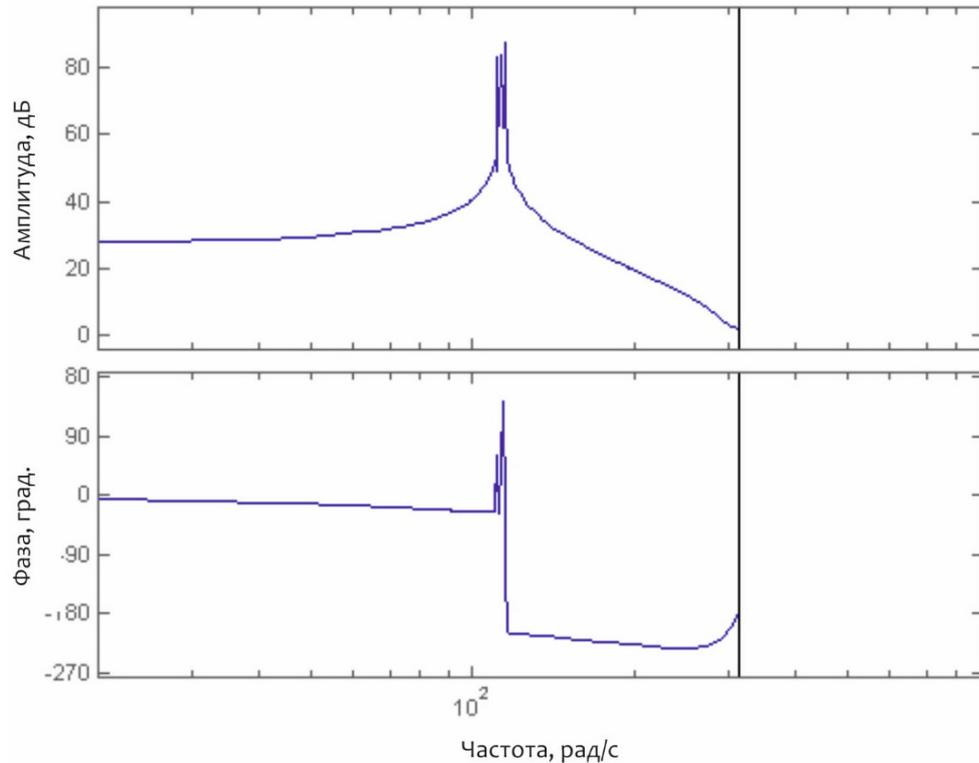


Рис. 5. Диаграмма Бode сигнала с близкими частотными составляющими

Метод Прони содержит три основных этапа: определение коэффициентов линейного предсказания  $a_j, j=1..p$ ; решение характеристического уравнения  $z^p + a_1 z^{p-1} + \dots + a_p = 0$ , корни которого  $z_{i,i+1} = e^{(\alpha_i \pm j2\pi f_i)\Delta t}$  несут информацию о собственных частотах и коэффициенте затухания колебания; определение комплексных амплитуд  $h_j = U_j e^{j\varphi_j}, j=1, \dots, p$ , по известным

корням  $y_i = \sum_{j=1}^p h_j z_j^i$ .

В методе Рутисхаузера [6] задача экспоненциальной аппроксимации сигнала  $F(t)$ , рассматриваемого в промежутке  $[t_0, T]$  состоит в определении параметров экспоненциальной суммы (1) по результатам  $2n$  измерений  $\{F(t_v)\}_0^{2n-1}$  сигнала  $F(t)$  в заданные последовательные моменты времени

$\{(t_\nu)\}_0^{2n-1}$ ,  $t_i \in [t_0, T]$ . Решение задачи сводится к представлению в виде суммы простейших дробей рациональной функции  $f(z)$ , представляющей  $z$ -преобразование исходной функции  $F(t)$ , для которой

$$F(t_\nu) = s_\nu = \sum_{k=1}^n a_k e^{\alpha_k(t_0 + \nu h)}, \quad \nu = 0, 1, \dots, 2n-1,$$

тогда

$$f(z) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{s_\nu}{z^{\nu+1}} = \sum_{k=1}^n \frac{c_k}{z - \lambda_k}, \quad \text{где } \lambda_k = e^{\alpha_k h}, \quad c_k = a_k e^{\alpha_k t_0}.$$

Применяется алгоритм Рутисхаузера к последовательности  $\{\tilde{s}_\mu\}_0^{M-1}$  следующим образом: по значениям  $\tilde{s}_\mu$  вычисляют частные  $\tilde{q}_k^{(\mu)}$  и разности  $\tilde{e}_k^{(\mu)}$ ,  $k = 1, 2, \dots$ , с помощью правил ромба:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{e}_k^{(\mu)} &= \tilde{e}_{k-1}^{(\mu+1)} + \tilde{q}_k^{(\mu+1)} - \tilde{q}_k^{(\mu)}, \\ \tilde{q}_{k+1}^{(\mu)} &= \tilde{q}_k^{(\mu+1)} \frac{\tilde{e}_k^{(\mu+1)}}{\tilde{e}_k^{(\mu)}}, \end{aligned} \right\} k = 1, 2, \dots,$$

при условии, что  $\tilde{q}_1^{(\mu)} = \tilde{s}_{\mu+1} / \tilde{s}_\mu$ ,  $\mu = 0, 1, \dots, M-1$ , а все числа  $\tilde{e}_0^{(\mu)}$  равны нулю.

В результате применения обоих алгоритмов получаем все параметры мод и аппроксимацию сигнала по формуле (1).

Снижение трудоемкости в методе Рутисхаузера по сравнению с методом Прони обусловлено тем фактом, что вместо трудоемкого решения степенного уравнения высокого порядка (например, методом Лагера в алгоритме Прони) в методе частных и разностей решаются степенные уравнения не выше второго порядка. Поэтому вместо трудоемкости оценивания параметров модели порядка  $p$  в методе Прони, пропорциональной  $p^3$ , при использовании метода частных и разностей получаем трудоемкость, пропорциональную  $4p \left( \frac{p}{2} \cdot 2^3 \right)$ . То есть трудоемкость снижается в  $p^2 / 4$  раза.

Итак, два фактора – меньшая трудоемкость и лучшее разрешение в частотной области – делают применение метода Рутисхаузера более предпочтительным.

Так как метод Рутисхаузера вычисляет частные и разности, то он довольно чувствителен к шумам и промахам измерений. Есть два подхода к снижению этой чувствительности: замена большим шагом дискретизации с интегрированием по интервалу [7, 8]; применение метода наименьших квадратов (МНК) для согласования  $N$  уравнений с порядком системы  $p$ . Хотя прямых предпосылок для применения второго подхода (МНК) нет, авторы основывались на общности некоторых этапов алгоритмов Прони и Рутисхаузера.

Первый подход, конечно, более обоснован и удобен, но в рассматриваемых задачах речь идет об очень близких частотных составляющих, следовательно, нежелательно увеличивать шаг дискретизации. Поэтому авторы остановились на втором, т.е. фактически используется комбинация методов Рутисхаузера и Прони.

Момент появления составляющей в сигнале может быть определен с помощью кросскорреляционной функции. На рис. 6 показан фрагмент сигнала, представляющего собой сумму близких частотных составляющих 37080, 40450, 41000 и 30000 Гц, а на рис. 7 – кросскорреляционная функция с одной из них: смещение экстремума функции относительно нуля показывает момент появления этой составляющей, а близость максимума нормированной корреляционной функции к «1» указывает на степень сходства.

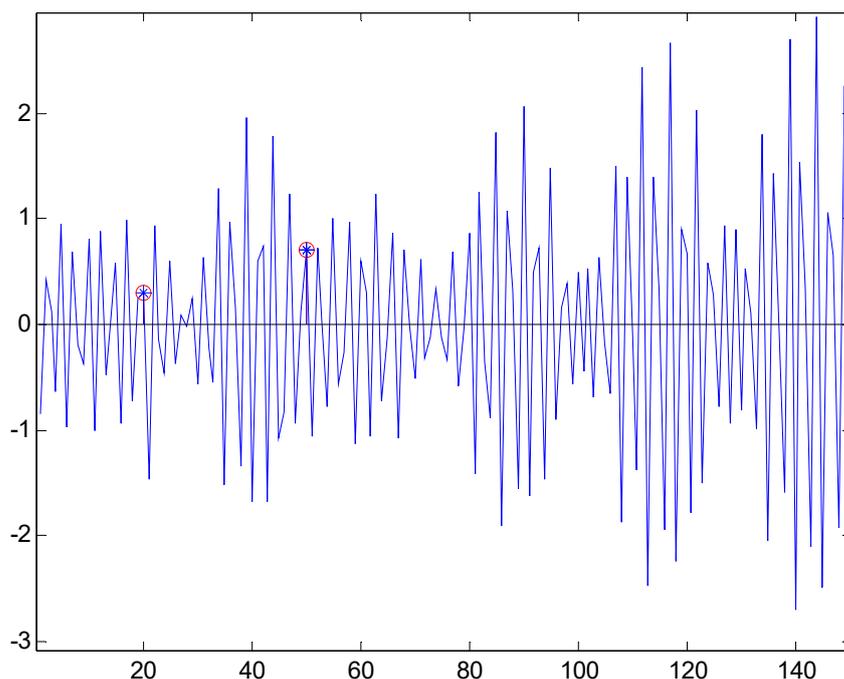


Рис. 6. Сигнал и определения «начала» его составляющих по корреляционной функции: по оси  $x$  номера отсчетов сигнала, а по оси  $y$  – его значения в размерных единицах

Точно определены моменты появления (номера отсчетов) составляющих [20 50 0], что показано на рис. 6 знаком «\*», а на рис. 7 приведена кросскорреляционная функция с одной из составляющих.

Некоторые вопросы локации уже рассматривались авторами. В работах использовался аппарат экстремальной фильтрации для обнаружения и локации объектов [9, 10].

### Заключение

Авторами обоснован выбор неинверсной ультразвуковой системы с частотным разделением. Обоснован, разработан и апробирован математический аппарат для решения задачи локации в ультразвуковых системах, обеспечи-

вающий разделение близких частотных составляющих. Дальнейшее направление исследований – адаптация алгоритмов к режиму реального времени.

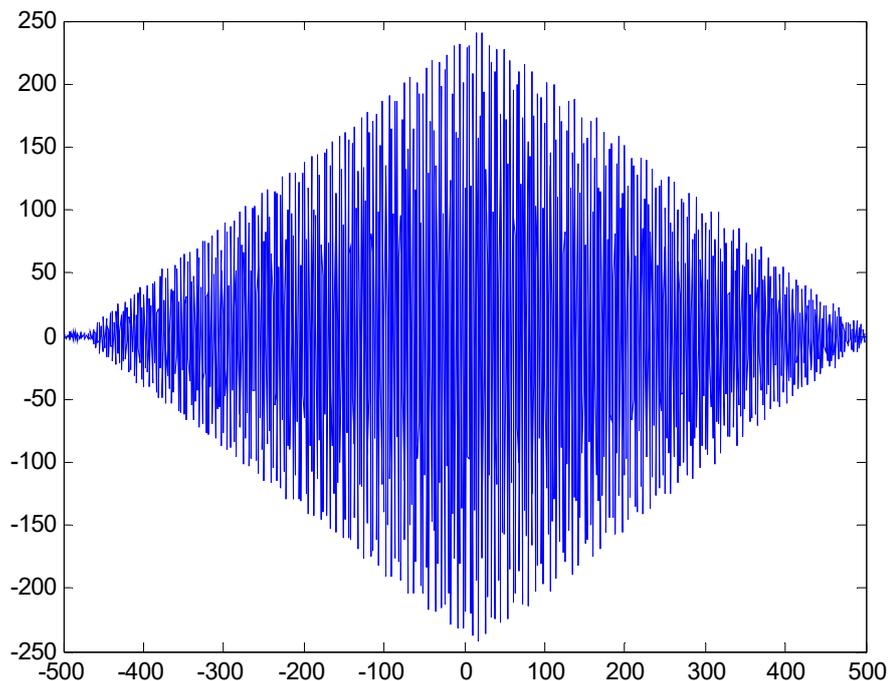


Рис. 7. Кросскорреляционная функция с одной из составляющих:  
по оси  $x$  отсчеты функции, по оси  $y$  – ее значения

#### **Библиографический список**

1. Аналитический обзор мирового рынка робототехники 2019, Sberbank Robotics Laboratory // sberbank.ru. – URL: [http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank\\_robotics\\_review\\_2019\\_17.07.2019\\_m.pdf](http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf) (дата обращения: 07.10.2019).
2. Ультразвуковой GPS // habr.com. – URL: <https://habr.com/ru/post/451408/> (дата обращения: 07.10.2019).
3. **Qi, J.** A robust high-accuracy ultrasound indoor positioning system based on a wireless sensor network / J. Qi, G.-P. Liu // Sensors. – 2017. – Vol. 17. – P. 2554.
4. **Jiang, W.** An Indoor Airborne Ultrasonic Wireless Communication Network / Wentao Jiang & William Wright // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2018. – P. 1–1. – DOI 10.1109/TUFFC.2018.2841501.
5. **Marpl, S.** Digital Spectral Analysis: With Applications, Prentice Hall, Englewood, Cliffs / S. Marpl. – New Jersey, 1987.
6. Der Quotienten-DifferenzenAlgorithmus / Von Heinz Rutishauser. – Basel-Stuttgart : BirkhäuserVerl, 1957. [Mitt. aus dem Inst. für angewandteMathematik].
7. Пат. 2467385 Российская Федерация. Способ и устройство для аппроксимации сигналов / Цыпин Б. В., Бондаренко Л. Н., Дмитриенко А. Г., Мясникова М. Г. – заявл. 04.08.2011 ; опубл. 20.11.2012. – Бюл. № 32. – 10 с.
8. Экспресс-анализ сигналов в инженерных задачах / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, Б. В. Цыпин, М. Г. Мясникова. – Москва : Физматлит, 2016. – 180 с.
9. **Боряк, С. В.** Ультразвуковая система навигации мобильных роботов / С. В. Боряк, Н. В. Мясникова // Информационные технологии в науке и образова-

нии. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 233–235.

10. **Мясникова, Н. В.** Ультразвуковая система локации объектов / Н. В. Мясникова, С. В. Боряк, Д. С. Пичейкин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию образования кафедры «Автоматика и телемеханика» : в 2 т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 217–219.

### **References**

1. *Analiticheskiy obzor mirovogo rynka robototekhniki 2019, Sberbank Robotics Laboratory* [Analytical review of the world robotics market in 2019, Sberbank Robotics Laboratory]. sberbank.ru. Available at: [http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank\\_robotics\\_review\\_2019\\_17.07.2019\\_m.pdf](http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf) (accessed Oct. 07, 2019). [In Russian]
2. *Ul'trazvukovoy GPS* [Ultrasound GPS]. habr.com. Available at: <https://habr.com/ru/post/451408/> (accessed Oct. 07, 2019). [In Russian]
3. Qi J., Liu G.-P. *Sensors*. 2017, vol. 17, p. 2554.
4. Jiang W., Wright W. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2018, pp. 1–1, 10.1109/TUFFC.2018.2841501.
5. Marpl S. *Digital Spectral Analysis: With Applications*, Prentice Hall, Englewood, Cliffs. New Jersey, 1987.
6. *Der Quotienten-Differenzen Algorithmus* [The quotient-difference algorithm]. Von Heinz Rutishauser. Basel-Stuttgart: BirkhäuserVerl, 1957. [Mitt. aus dem Inst. für angewandte Mathematik].
7. *Pat. 2467385 Rossiyskaya Federatsiya. Sposob i ustroystvo dlya approksimatsii signalov* [Patent 2467385, the Russian Federation. A device and technology of signal approximation]. Tsy-pin B. V., Bondarenko L. N., Dmitrienko A. G., Myasnikova M. G. BI, 2012, 32 p. [In Russian]
8. Myasnikova N. V., Beresten' M. P., Tsy-pin B. V., Myasnikova M. G. *Ekspress-analiz signalov v inzhenernykh zadachakh* [Express analysis of signals in engineering problems]. Moscow: Fizmatlit, 2016, 180 p. [In Russian]
9. Boryak S. V., Myasnikova N. V. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: proceedings of an All-Russian interregional scientific and practical conference]. Penza, 2018, pp. 233–235. [In Russian]
10. Myasnikova N. V., Boryak S. V., Picheykin D. S. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf., posvyashch. 55-letiyu obrazovaniya kafedry «Avtomatika i telemekhanika»: v 2 t.* [Problems of automation and control in technical systems: proceedings of XXXIII International scientific and technical conference devoted to the 55<sup>th</sup> anniversary of the “Automation and remote control” sub-department: in 2 volumes]. Penza, 2019, pp. 217–219. [In Russian]

---

**Мясникова Нина Владимировна**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра автоматике и телемеханики,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: genok123@mail.ru

**Myasnikova Nina Vladimirovna**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of automation and remote  
control, Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Боряк Сергей Васильевич**

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

E-mail: boosoov@gmail.com

**Boryak Sergey Vasil'evich**

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

**Мясникова Мария Геннадьевна**

кандидат технических наук, доцент, кафедра ракетно-космического и авиационного приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: urchin\_blue@mail.ru

**Myasnikova Mariya Gennad'evna**

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of rocket-space and aircraft instrument engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Мясникова, Н. В. Обработка сигналов в системах ультразвуковой локализации объектов для закрытых помещений / Н. В. Мясникова, С. В. Борьяк, М. Г. Мясникова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 87–97. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-7.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

---

УДК 53.08

DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-8

А. С. Кравчук, А. И. Кравчук

## УТОЧНЕННАЯ ТЕОРИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ СЖАТИИ ПО ИЗМЕРЕННОЙ ТВЕРДОСТИ ПО МЕЙЕРУ

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования является задача об упругопластическом вдавливании индентеров различной формы в упругопластическое покрытие. Актуальность задачи обусловлена тем, что она является теоретической основой измерений твердости поверхности деталей на производстве. Предметом исследования является установление связи между показателями твердости поверхности по Мейеру и предела текучести при сжатии. Цель исследования – построение уточненных формул, связывающих твердость по Мейеру и предел текучести при сжатии с учетом упрочнения материала при сжатии.

*Материалы и методы.* Уточненная теория определения параметров пластического течения материала при сжатии по измеренной твердости по Мейеру построена с использованием обобщенной стержневой модели покрытия. Рассматриваются все типы индентеров, используемых как в промышленности, так и в научных исследованиях. В качестве аппроксимации упругопластического поведения материала используется общеизвестная билинейная диаграмма Прандтля. Именно она нашла наиболее широкое распространение в инженерно-ориентированном программном обеспечении для моделирования упругопластического поведения конструкций.

*Результаты.* Впервые получены уравнения, определяющие связь двух параметров пластичности при сжатии (предела текучести и отношения модуля пластичности к модулю упругости) со значениями твердости по Мейеру. Термин «модуль пластичности» определяет угол наклона участка упрочнения к оси деформаций. Поскольку полученные в статье результаты формально не зависят от толщины покрытия, то их можно трактовать как универсальные, верные для любых твердых тел.

*Выводы.* Установлено, что для однозначного определения двух параметров пластичности при сжатии проще всего использовать два индентера разной формы. Это могут быть шары различных диаметров, либо шар и конус со стандартным углом при вершине, либо шар и пирамида (также со стандартным углом наклона граней). При этом на первом шаге за счет выбора относительно большого диаметра шара и малой силы исследователь получит возможность однозначно определиться с пределом текучести, а уже второй пара-

---

© Кравчук А. С., Кравчук А. И., 2019. 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.

метр будет определяться по внедрению второго индентера (шара малого радиуса, конуса или пирамиды).

**Ключевые слова:** упругопластическое вдавливание индентора, билинейная диаграмма Прандтля, упрочнение, модуль пластичности, предел текучести.

*A. S. Kravchuk, A. I. Kravchuk*

## AN IMPROVED THEORY OF DETERMINING THE PARAMETERS OF PLASTIC FLOW OF MATERIAL UNDER COMPRESSION BY MEASURED MEYER HARDNESS

### **Abstract.**

*Background.* The research object is a problem of elastoplastic indentation of indenters of various shapes in an elastoplastic coating. It is relevant as it is the theoretical basis for measuring the surface hardness of parts in production. The research subject is the establishment of a relationship between the surface Meyer hardness and yield strength under compression. The aim of the study is to construct improved formulas that bind Meyer hardness and yield strength under compression, taking into account the hardening of the material under compression.

*Materials and methods.* An improved theory of determining the parameters of the plastic flow of a material under compression by the measured Meyer hardness is constructed using a generalized core model of the coating. All types of indenters used both in industry and in scientific research are considered. As an approximation of the elastoplastic behavior of the material, the well-known Prandtl bilinear diagram is used. It was this diagram that found the most widespread use in engineering-oriented software for modeling the elastic-plastic behavior of a structure.

*Results.* For the first time, equations are obtained that determine the relationship between two plasticity parameters under compression (yield strength and the ratio of the plastic modulus to the elastic modulus) with the values of Meyer hardness. The term “plasticity modulus” is a direct borrowing from the manual to the ANSYS finite element calculation program. It determines the angle of inclination of the hardening section to the axis of deformation. Since the results obtained in the article formally do not depend on the thickness of the coating, they can be interpreted as universal, true for any solids.

*Conclusions.* It is established that for the unambiguous determination of two plasticity parameters during compression, it is easiest to use two indenters of different shapes. It can be balls of various diameters, or a ball and a cone with a standard angle at the apex, or a ball and a pyramid (also with a standard angle of inclination of the faces). In this case, at the first step, due to the choice of a relatively large diameter of the ball and low force, the researcher will be able to uniquely determine the yield strength, and the second parameter will be determined by the introduction of the second indenter (a ball of small radius, a cone or a pyramid).

**Keywords:** elastic plastic indentation, Prandtl bilinear diagram, hardening, plasticity modulus, yield strength.

### **Введение**

Теоретическое изучение механики контактного взаимодействия важно как по практическим соображениям, так и с точки зрения общего развития знаний о твердом теле [1–3]. Одним из наиболее востребованных в практических исследованиях направлением является решение контактных задач, моделирующих статические испытания на твердость [2].

Актуальность этого направления исследований также подчеркивается количеством экспериментальных исследований, выполненных на разных масштабных уровнях [4, 5].

С другой стороны, отсутствие адекватных решений модельных задач, соответствующих условиям проведения экспериментальных исследований, иногда может приводить к тому, что исследователи, не имея достаточного опыта, делают неверные выводы о характеристиках материала.

Определению параметров пластического упрочнения материала по результатам вдавливания инденторов посвящен ряд работ [6, 7]. Но специфичность использованных авторами [6, 7] аппроксимаций пластического поведения, отсутствие пояснений, каким образом им удалось избежать влияния упругих деформаций на результаты определения параметров упрочнения при вдавливании конического индентора и, соответственно, на определяемые пластические характеристики, не позволяют широко применить полученные данные в существующих программах конечноэлементного анализа [8] при решении проектных задач.

В данной статье последовательно решается упругопластическая задача о вдавливании индентора в стержневую модель покрытия. Рассматриваются все типы инденторов, используемых как в промышленности, так и в научных исследованиях. В качестве аппроксимации упругопластического поведения материала используется общеизвестная билинейная диаграмма Прандтля. Именно она нашла наиболее широкое распространение в инженерно-ориентированном программном обеспечении для моделирования упругопластического поведения конструкций [8].

Одной из задач, не нашедших до настоящего времени отражения в теоретической литературе, является решение упругопластической контактной задачи с учетом упрочнения материала при сжатии в соответствии с билинейной диаграммой Прандтля, при этом для идеально пластических тел (без упрочнения) можно найти достаточно решений [2, 3, 9, 10]. В связи с этим авторы решили восполнить этот пробел и с использованием обобщенной стержневой модели покрытия получить уравнения, связывающие твердость по Мейеру, предел текучести при сжатии, а также отношение модуля пластичности при сжатии к модулю упругости. Терминологически необходимо уточнить, что словосочетание «модуль пластичности» – это прямое заимствование из руководства к программе конечноэлементных расчетов ANSYS [8]. Он определяет угол наклона участка упрочнения к оси деформаций. Естественно, необходимо отметить, что при идеальнопластическом поведении материала модуль пластичности равен нулю и, очевидно, не может быть больше модуля упругости.

Целью работы является выявление влияния параметров билинейной аппроксимации кривой упрочнения при сжатии на напряженно-деформированное состояние в области контакта, а также на определение такой технологической величины, как твердость поверхности изделия по Мейеру.

### **1. Основные гипотезы**

Предполагается, что поверхность покрытия плоская. Это значит, что отклонения поверхности малы в сравнении с глубиной внедрения индентора

[11]. Деформируемое покрытие покрывает гладкое жесткое полупространство [3, 10].

Предполагается, что покрытие может быть заменено призматическими стержнями с постоянным квадратным сечением  $\Delta \times \Delta$  в плоскости  $XOY$  и высотой  $h$  в  $Z$ -направлении. Стержни могут перемещаться только в  $Z$ -направлении, при этом напряженно-деформированное состояние каждого призматического элемента является однородным. Размер  $\Delta$  пренебрежимо мал в сравнении с наименьшим характерным размером области контакта в плоскости  $XOY$  [3, 10].

Нелинейная функция  $\mathfrak{S}(\varepsilon)$  в диаграмме сжатия будет определяться билинейной диаграммой Прандтля:

$$\mathfrak{S}(\varepsilon) = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & \frac{\sigma_T^{сж}}{E} < \varepsilon \leq 0, \\ \sigma_T^{сж} + E_T^{сж} \cdot \left( \varepsilon - \frac{\sigma_T^{сж}}{E} \right), & \varepsilon \leq \frac{\sigma_T^{сж}}{E}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E$ ,  $E_T^{сж}$ ,  $\sigma_T^{сж}$  – характерные для материала константы: модуль упругости, модуль пластичности, предел текучести, определяемые исходя из аппроксимации с помощью (1) диаграммы одноосного сжатия образца материала. Отметим, что значение  $\sigma_T^{сж}$  (1) должно быть отрицательным.

В статье предполагается, что постановка всех задач имеет геометрическую и физическую симметрию и, соответственно, главные опрокидывающие внедряемый штамп моменты равны нулю.

## 2. Вдавливание параболоида вращения

Перемещения  $w(r,0)$  и деформации  $\varepsilon(r,0)$  в области контакта при внедрении абсолютно жесткого параболоида вращения с уравнением границы при касании поверхности покрытия  $f(r) = \frac{r^2}{2R}$  (где радиус кривизны параболоида в вершине  $R$ ) в рамках стержневой модели покрытия определяются выражениями (рис. 1) [3, 10]:

$$w(r,0) = \frac{r^2 - a^2}{2R}, \quad \varepsilon(r,0) = \frac{w(r,0)}{h} = \frac{r^2 - a^2}{2R \cdot h}, \quad (2)$$

где  $a$  – радиус области контакта.

При этом максимальная глубина  $\delta$  вдавливания индентора определяется исходя из элементарного равенства

$$\delta = w(0,0) = \frac{-a^2}{2R}. \quad (3)$$

Отметим, что деформации сжатия в области контакта монотонно возрастают при стремлении  $r$  к нулю, поэтому существует граница круга пластических деформаций  $a_T$  ( $a_T \in [0, a)$ ) такая, что выполнено равенство (рис. 2) [3, 10]:

$$\varepsilon(a_T, 0) = \frac{\sigma_T^{сж}}{E}. \quad (4)$$

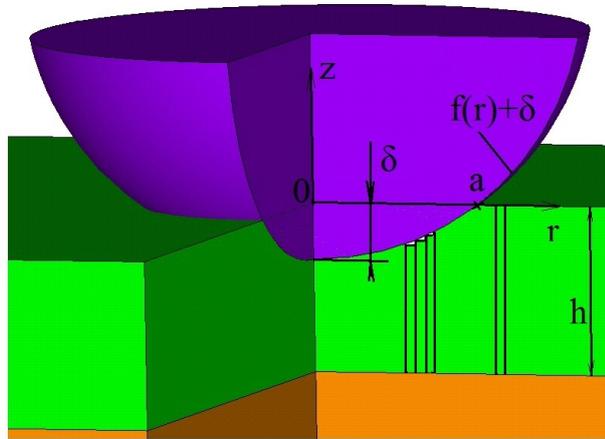


Рис. 1. Вдавливание параболоида вращения в покрытие конечной высоты

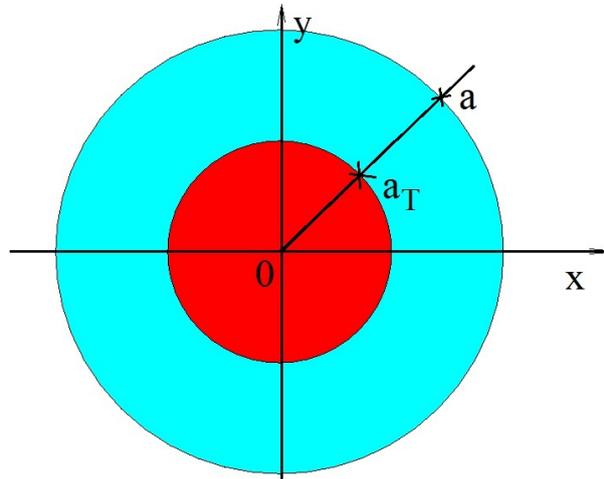


Рис. 2. Распределение напряжений в области контакта параболоида вращения и покрытия (голубой цвет – упругие, красный цвет – пластические напряжения)

Отметим, что  $a_{\text{пласт}}$  теоретически является измеренным радиусом пластического отпечатка после снятия нагрузки (рис. 2) [3, 10].

Из (2) и (4) можно получить два равенства [3, 10]:

$$|\sigma_T^{сж}| = E \frac{a^2 - a_T^2}{2R \cdot h}, \quad (5)$$

$$a_T = \sqrt{\left( a^2 - 2R \cdot h \cdot \frac{|\sigma_T^{сж}|}{E} \right)}. \quad (6)$$

Таким образом, согласно (6) при  $a \geq \sqrt{2R \cdot h \cdot \frac{|\sigma_T^{сж}|}{E}}$  существует вычисляемый круг радиуса  $a_T$ , внутри которого происходит пластическая деформация стержня, а снаружи этого круга уравнение состояния линейно упругое. Исходя из этого описания и с учетом (1) можно получить распределение напряжений в области контакта:

$$\sigma_z = \mathfrak{S}(\varepsilon) = \begin{cases} E \cdot \frac{r^2 - a^2}{2 \cdot R \cdot h}, & a_T < r \leq a, \\ \sigma_T^{сж} + E_T^{сж} \cdot \left( \frac{r^2 - a^2}{2 \cdot R \cdot h} - \frac{\sigma_T^{сж}}{E} \right), & 0 \leq r \leq a_T. \end{cases} \quad (7)$$

Перейдем к рассмотрению уравнения равновесия для параболоида вращения. Из (11) и (7) получаем нелинейное уравнение для определения величины нагрузки  $P$  по заданному радиусу контакта  $a$  (при  $a \geq \sqrt{2R \cdot h \cdot \frac{|\sigma_T^{сж}|}{E}}$ ):

$$\begin{aligned} P = -2\pi \int_0^a \sigma_z(r, 0) \cdot r dr &= -2\pi \cdot \left( \int_0^{a_T} \left( \sigma_T^{сж} + E_T^{сж} \cdot \left( \frac{r^2 - a^2}{2 \cdot R \cdot h} - \frac{\sigma_T^{сж}}{E} \right) \right) \cdot r dr + \right. \\ &+ \left. \frac{E}{2R \cdot h} \cdot \int_{a_T}^a (r^2 - a^2) \cdot r dr \right) = \pi \cdot \left( |\sigma_T^{сж}| \cdot a_T^2 - |\sigma_T^{сж}| \cdot a_T^2 \cdot \frac{E_T^{сж}}{E} + \right. \\ &+ \left. \left( E \frac{a^2 - a_T^2}{2 \cdot R \cdot h} \right) \cdot \frac{a^2 - a_T^2}{2} - \left( E \frac{a^2 - a_T^2}{2 \cdot R \cdot h} \right) \cdot \frac{E_T^{сж}}{E} \cdot \frac{a^2 - a_T^2}{2} + \frac{a^4 \cdot E_T^{сж}}{4 \cdot h \cdot R} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Используя равенство (5), перепишем (8) в виде

$$P = \pi \cdot |\sigma_T^{сж}| \cdot a_T^2 \left( \left( 1 - \frac{E_T^{сж}}{E} \right) \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{a^2}{a_T^2} - 1 \right) \right) + \frac{1}{|\sigma_T^{сж}| \cdot a_T^2} \frac{a^4 \cdot E_T^{сж}}{4 \cdot h \cdot R} \right). \quad (9)$$

Следует отметить, что (5) в случае идеально пластического тела ( $E_T^{сж} = 0$ ) совпадает с результатами более ранних работ авторов [3, 10]. Поскольку из (5) следует равенство  $2R \cdot h \cdot |\sigma_T^{сж}| = E \cdot (a^2 - a_T^2)$ , то можно продолжить преобразования (9) с использованием известного равенства, получаемого из (3), для параболоида вращения  $a = \sqrt{2 \cdot R \cdot |\delta|}$  (где  $|\delta|$  – абсолютное значение глубины вдавливания):

$$P = \pi \cdot |\sigma_T^{сж}| \cdot a_T^2 \left( \left( 1 - \frac{E_T^{сж}}{E} \right) \cdot \frac{(1 + \beta_{ш}^2)}{2} + \frac{E_T^{сж}}{E} \cdot \frac{\beta_{ш}^4}{2 \cdot (\beta_{ш}^2 - 1)} \right), \quad (10)$$

где

$$\beta_{\text{шара}} = \frac{a}{a_T} = \frac{\sqrt{2 \cdot R \cdot |\delta|}}{a_T}. \quad (11)$$

Продолжив преобразования (10), можно получить:

$$P = \pi \cdot |\sigma_T^{\text{сж}}| \cdot a_T^2 \cdot \frac{(1 + \beta_{\text{ш}}^2)}{2} \left( 1 + \frac{E_T^{\text{сж}}}{E} \frac{1}{(\beta_{\text{ш}}^4 - 1)} \right).$$

Деля обе части предыдущего уравнения на площадь пластического отпечатка  $\pi \cdot a_T^2$ , получаем выражение для определения  $|\sigma_T^{\text{сж}}|$  и отношения  $\frac{E_T^{\text{сж}}}{E}$  по результатам вдавливания индентора:

$$HM = |\sigma_T^{\text{сж}}| \cdot \frac{(1 + \beta_{\text{ш}}^2)}{2} \left( 1 + \frac{E_T^{\text{сж}}}{E} \frac{1}{(\beta_{\text{ш}}^4 - 1)} \right). \quad (12)$$

Исходя из (12) можно сформулировать требования к определению пластических параметров материалов при вдавливании шаровидного индентора (статическая твердость по Бринеллю). Учитывая, что при сжатии  $\frac{E_T^{\text{сж}}}{E} < 0,3$  на первом шаге, необходимо добиться за счет выбора большого радиуса индентора и относительно малой силы вдавливания, чтобы коэффициент  $\beta_{\text{ш}}$  (11) был более или равен 1,5. В этом случае (12) преобразуется к более простому виду:

$$HM \approx |\sigma_T^{\text{сж}}| \cdot \frac{(1 + \beta_{\text{ш}}^2)}{2}. \quad (13)$$

Таким образом, в указанных выше условиях твердость по Мейеру не будет зависеть от модуля  $E_T^{\text{сж}}$ , т.е. не будет зависеть от упрочнения материала, и абсолютная величина предела текучести при сжатии  $|\sigma_T^{\text{сж}}|$  будет определена однозначно.

Далее можно за счет уменьшения радиуса индентора и увеличения силы вдавливания довести  $\beta_{\text{ш}}$  до значений меньших либо равных 1,2. Это позволит вычислить отношение  $\frac{E_T^{\text{сж}}}{E}$  по (12) с учетом ранее определенного значения  $|\sigma_T^{\text{сж}}|$ .

Поскольку предварительно можно определить модуль упругости  $E$  на разрывной машине, то предлагаемая методика позволяет определить два параметра пластичности материала при сжатии  $|\sigma_T^{\text{сж}}|$  и  $E_T^{\text{сж}}$ .

### 3. Решение задачи для конического индентора

В случае вдавливания осесимметричного конического абсолютно жесткого индентора с уравнением границы  $\text{tg}(\alpha) \cdot r + \delta$  (где  $\alpha$  – угол между об-

разующей и поверхностью покрытия) перемещения и деформации в области контакта определяются выражениями (рис. 3) [3, 10]:

$$w(r,0) = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (r - a), \quad \varepsilon(r,0) = \frac{w(r,0)}{h} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (r - a)}{h}. \quad (14)$$

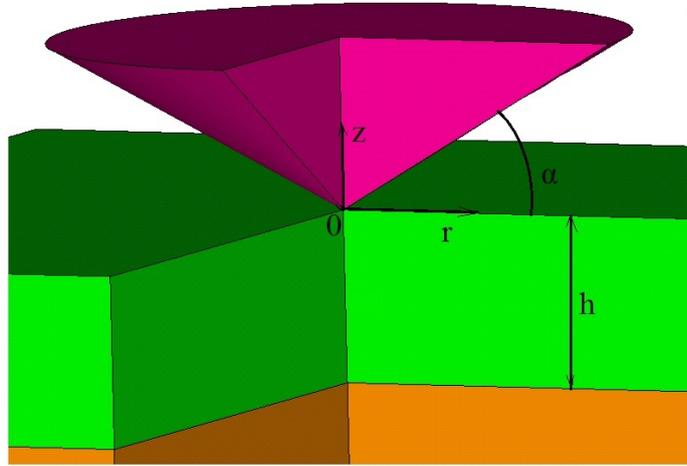


Рис. 3. Контактная задача для конуса

С учетом конической формы индентора максимальная глубина вдавливания индентора определяется исходя из элементарного равенства:

$$\delta = w(0,0) = -\operatorname{tg}(\alpha) \cdot a. \quad (15)$$

Как и ранее, в связи с монотонным возрастанием контактных деформаций при стремлении к центру области контакта будем предполагать, что существует радиус  $a_T$  ( $0 < a_T < a$ ) такой, что выполняется уравнение

$$\varepsilon(a_T,0) = \frac{\sigma_T^{\text{сж}}}{E}. \quad (16)$$

Из (14) и (16) можно получить следующие равенства:

$$|\sigma_T^{\text{сж}}| = E \cdot \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (a - a_T)}{h}, \quad (17)$$

$$a_T = a - \frac{h}{\operatorname{tg}(\alpha)} \frac{|\sigma_T^{\text{сж}}|}{E}. \quad (18)$$

Согласно (18) при  $a \geq \frac{h}{\operatorname{tg}(\alpha)} \frac{|\sigma_T^{\text{сж}}|}{E}$  существует вычисляемый круг ради-

уса  $a_T$ , внутри которого напряжение постоянны и равны  $\sigma_T^{\text{сж}}$ , а снаружи этого круга уравнение состояния линейно упругое. Исходя из этого описания деформаций и с учетом (9) можно получить распределение напряжений в области контакта конического индентора:

$$\sigma_z = \mathfrak{Z}(\varepsilon) = \begin{cases} E \cdot \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (r-a)}{h}, & a_T < r \leq a, \\ \sigma_T^{\text{сжк}} + E_T^{\text{сжк}} \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (r-a)}{h} - \frac{\sigma_T^{\text{сжк}}}{E} \right), & 0 \leq r \leq a_T. \end{cases} \quad (19)$$

Подставляя (19) в уравнение равновесия, получаем следующее уравнение (при  $a \geq \frac{h}{\operatorname{tg}(\alpha)} \left| \frac{\sigma_T^{\text{сжк}}}{E} \right|$ ):

$$\begin{aligned} P = -2\pi \int_0^a \sigma_z(r, 0) \cdot r dr = -2\pi \cdot \left( \int_0^{a_T} \left( \sigma_T^{\text{сжк}} + E_T^{\text{сжк}} \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (r-a)}{h} - \frac{\sigma_T^{\text{сжк}}}{E} \right) \right) \cdot r dr + \right. \\ \left. + \frac{E}{h} \cdot \int_{a_T}^a \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (r-a) \cdot r dr \right) = \pi \cdot \left( \left| \sigma_T^{\text{сжк}} \right| \cdot a_T^2 \left( 1 - \frac{E_T^{\text{сжк}}}{E} \right) + \right. \\ \left. + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (E - E_T^{\text{сжк}}) \cdot \frac{(a-a_T)^2 \cdot (a+2 \cdot a_T)}{3 \cdot h} + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot E_T^{\text{сжк}} \cdot \frac{a^3}{3 \cdot h} \right). \quad (20) \end{aligned}$$

После подстановки (17) выражение (20) можно переписать в виде

$$P = \pi \cdot \left( \left| \sigma_T^{\text{сжк}} \right| \cdot a_T^2 \cdot \left( 1 - \frac{E_T^{\text{сжк}}}{E} \right) \cdot \left( 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{a}{a_T} - 1 \right) \cdot \left( \frac{a}{a_T} + 2 \right) \right) + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot E_T^{\text{сжк}} \cdot \frac{a^3}{3 \cdot h} \right). \quad (21)$$

Следует отметить, что (21) в случае идеально пластического тела ( $E_T^{\text{сжк}} = 0$ ) совпадает с результатами более ранних работ авторов [3, 10]. Поскольку из (17) следует равенство  $\left| \sigma_T^{\text{сжк}} \right| \cdot h = E \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (a - a_T)$ , то с использованием известного равенства, получаемого из (15), для конуса  $\beta_k = \frac{a}{a_T} = \frac{|\delta|}{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot a_T}$  (где  $|\delta|$  – абсолютное значение глубины вдавливания)

можно продолжить преобразования и из (21) получить:

$$P = \pi \cdot \left| \sigma_T^{\text{сжк}} \right| \cdot a_T^2 \cdot \left( \left( 1 - \frac{E_T^{\text{сжк}}}{E} \right) \cdot \frac{(1 + \beta_k + \beta_k^2)}{3} + \frac{E_T^{\text{сжк}}}{3 \cdot E} \cdot \frac{\beta_k^3}{(\beta_k - 1)} \right).$$

Вынося в последнем равенстве второй множитель первого слагаемого за скобки, окончательно получаем

$$P = \pi \cdot \left| \sigma_T^{\text{сжк}} \right| \cdot a_T^2 \cdot \frac{(1 + \beta_k + \beta_k^2)}{3} \cdot \left( 1 + \frac{E_T^{\text{сжк}}}{E} \cdot \frac{\beta_k^3}{(\beta_k^3 - 1)} \right).$$

Переходя к твердости по Мейеру, можно вывести, что для конического индентора:

$$HM = |\sigma_T^{сж}| \cdot \frac{(1 + \beta_k + \beta_k^2)}{3} \cdot \left( 1 + \frac{E_T^{сж}}{E} \cdot \frac{\beta_k^3}{(\beta_k^3 - 1)} \right). \quad (22)$$

Исходя из (22) можно сформулировать требования к определению пластических параметров материалов при вдавливании конического индентора. Как и ранее предполагая, что при сжатии  $\frac{E_T^{сж}}{E} < 0,3$ , на первом шаге необходимо добиться за счет выбора большего угла раствора конуса (меньшего угла  $\alpha$  при вершине (рис. 3)) и относительно малой силы вдавливания, чтобы коэффициент  $\beta_k$  был более или равен 1,7. В этом случае (22) преобразуется к более простому виду:

$$HM \approx |\sigma_T^{сж}| \cdot \frac{(1 + \beta_k + \beta_k^2)}{3}.$$

В указанных выше условиях твердость по Мейеру не будет зависеть от модуля  $E_T^{сж}$ , т.е. не будет зависеть от упрочнения материала, и абсолютная величина предела текучести при сжатии  $|\sigma_T^{сж}|$  будет определена однозначно.

Далее можно за счет уменьшения угла раствора конуса (увеличения угла  $\alpha$  (рис. 3)) и увеличения силы вдавливания довести  $\beta_k$  до значений, меньших либо равных 1,2. Это позволит вычислить отношение  $\frac{E_T^{сж}}{E}$  по (22) с учетом ранее определенного значения  $|\sigma_T^{сж}|$ .

Отметим, что если угол раствора конуса является стандартным, то для определения двух параметров пластичности целесообразно использовать два индентора: подобрать шар для однозначного определения  $|\sigma_T^{сж}|$  по (13) и использовать стандартный конус для определения отношения  $\frac{E_T^{сж}}{E}$  по (22).

Учитывая, что предварительно можно определить модуль упругости  $E$  на разрывной машине, то предлагаемая методика позволяет определить два параметра пластичности материала при сжатии  $|\sigma_T^{сж}|$  и  $E_T^{сж}$ .

#### 4. Вдавливание многогранной пирамиды с равными боковыми поверхностями

Рассмотрим случай, когда индентором является правильная пирамида с  $m$  гранями, имеющая в качестве боковых  $(m-1)$  равных треугольных граней при вершине. В соответствии с планом решения задач для правильных пирамид (рис. 4) [3, 10] будем рассматривать часть  $\Omega$  правильной многоугольной области контакта  $S$ .

Перемещения и деформации в области  $\Omega$  определяются уравнением

$$w(x, y, 0)|_{\Omega} = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (x - a),$$

$$\varepsilon(x, y, 0)|_{\Omega} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (x - a)}{h}.$$

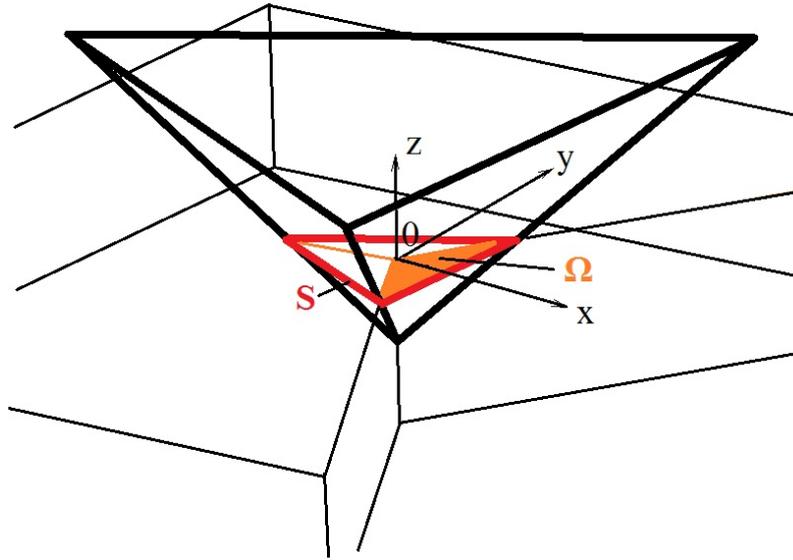


Рис. 4. Контактная область правильной пирамиды с  $m$  гранями (где  $m = 4$ , пирамида Берковича)

Исходя из пирамидальной формы индентера максимальная глубина его вдавливания определяется из элементарного равенства

$$\delta = w(0, 0, 0) = -\operatorname{tg}(\alpha) \cdot a. \quad (23)$$

Не повторяя совершенно аналогичных конусу математических преобразований и опираясь на результаты, подробно изложенные в ранних работах авторов [3, 10], можно утверждать, что для твердости по Мейеру для правильных многогранных пирамид уравнение связывающее его с пределом текучести при сжатии будет иметь вид совершенно аналогичный (22):

$$HM = |\sigma_T^{\text{сж}}| \cdot \frac{(1 + \beta_n + \beta_n^2)}{3} \cdot \left( 1 + \frac{E_T^{\text{сж}}}{E} \cdot \frac{\beta_n^3}{(\beta_n^3 - 1)} \right),$$

где с учетом (23) и того, что  $a_T$  – радиус вписанной в пластический отпечаток окружности, а  $\alpha$  – угол между плоскостями пирамиды и плоскостью покрытия [3, 10], имеем

$$\beta_n = \frac{a}{a_T} = \frac{|\delta|}{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot a_T}.$$

Рассуждая аналогично коническому индентору и исходя из того, что угол при вершине пирамиды является величиной стандартной, то для измерения двух параметров пластичности при сжатии целесообразно использовать

два индентора: шар с относительно большим радиусом и пирамиду со стандартным углом при вершине (совершенно аналогично ранее предложенной паре шар и конус).

### Заключение

Впервые получены уравнения, определяющие связь двух параметров пластичности при сжатии (предела текучести и отношения модуля пластичности к модулю упругости) со значениями твердости по Мейеру.

В данном исследовании использована обобщенная стержневая модель покрытия. Поскольку полученные результаты формально не зависят от толщины покрытия, их можно трактовать как универсальные, верные для любых твердых тел.

Установлено, что для однозначного определения двух параметров пластичности при сжатии проще всего использовать два индентора разной формы. Это могут быть шары различных диаметров, либо шар и конус со стандартным углом при вершине, либо шар и пирамида (также со стандартным углом наклона граней). При этом на первом шаге за счет выбора относительно большого диаметра шара и малой силы исследователь поучит возможность однозначно определиться с пределом текучести, а уже второй параметр будет определяться по внедрению второго индентора (шара малого радиуса, конуса или пирамиды).

### Библиографический список

1. **Джонсон, К.** Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – Москва : Мир, 1989. – 510 с.
2. **Ишлинский, А. Ю.** Осесимметрическая задача пластичности и проба Бринеля / А. Ю. Ишлинский // Прикладная математика и механика. – 1944. – Т. 8, № 3. – С. 201–224.
3. **Кравчук, А. С.** Прикладные контактные задачи для обобщенной стержневой модели покрытия : монография / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук. – Санкт-Петербург : Научное издание, 2019. – 221 с. – URL: [https://publishing.intelgr.com/archive/core\\_model.pdf](https://publishing.intelgr.com/archive/core_model.pdf) (дата обращения: 24.07.2019)
4. **Марченков, А. Ю.** Исследование микро- и макротвердости материалов и влияния на них скорости индентирования / А. Ю. Марченков, В. М. Матюнин, Е. Б. Опаричев, М. А. Проходцов // Технология металлов. – 2013. – № 2. – С. 54–56.
5. **Быков, Ю. А.** Нанотвердость поверхностного слоя твердых тел / Ю. А. Быков, С. Д. Карпунин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 6. – С. 40–43.
6. **Коновалов, Д. А.** Напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при вдавливании конического бойка в упругопластическую среду / Д. А. Коновалов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2006. – № 12. – С. 24–27.
7. **Коновалов, Д. А.** Определение сопротивления деформации по результатам вдавливания конических инденторов / Д. А. Коновалов, С. В. Смирнов, Д. И. Вичужанин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 3. – С. 69–70.
8. ANSYS. – URL: <https://www.ansys.com> (дата обращения: 24.07.2019).
9. **Kravchuk, A.** Penetration of a pyramid indenter into a multilayer coating / A. Kravchuk, Z. Rymuza, D. Jarzabek // Int. J. Mat. Res. (formerly Z. Metallkd.). – 2009. – Vol. 100, № 7. – P. 933–935.

10. **Кравчук, А. С.** Определение предела текучести материала по результатам статического вдавливания инденторов / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5173> (дата обращения: 24.07.2019).
11. **Кравчук, А. С.** Геометрический критерий надежности измерений микро- и нанотвердости, участков диаграмм вдавливания инденторов, а также кривой ползучести при вдавливании / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук // Перспективы науки. – 2018. – № 9 (108). – С. 12–22.

### **References**

1. Dzhonson K. *Mekhanika kontaktного vzaimodeystviya* [Contact interaction mechanics]. Moscow: Mir, 1989, 510 p. [In Russian]
2. Ishlinskiy A. Yu. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied mathematics and mechanics]. 1944, vol. 8, no. 3, pp. 201–224. [In Russian]
3. Kravchuk A. S., Kravchuk A. I. *Prikladnye kontaktnye zadachi dlya obobshchennoy sterzhnevoy modeli pokrytiya: monografiya* [Applied contact problems for a generalized coating model: monograph]. Saint-Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2019, 221 p. Available at: [https://publishing.intelgr.com/archive/core\\_model.pdf](https://publishing.intelgr.com/archive/core_model.pdf) (accessed Jul. 24, 2019) [In Russian]
4. Marchenkov A. Yu., Matyunin V. M., Oparichev E. B., Prokhodtsov M. A. *Tekhnologiya metallov* [Metal technologies]. 2013, no. 2, pp. 54–56. [In Russian]
5. Bykov Yu. A., Karpukhin S. D. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank production in mechanical engineering]. 2015, no. 6, pp. 40–43. [In Russian]
6. Kononov D. A. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem* [Press forging. Pressure treatment of metals]. 2006, no. 12, pp. 24–27. [In Russian]
7. Kononov D. A., Smirnov S. V., Vichuzhanin D. I. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [University proceedings. Ferrous metallurgy]. 2007, no. 3, pp. 69–70. [In Russian]
8. ANSYS. Available at: <https://www.ansys.com> (accessed Jul. 24, 2019).
9. Kravchuk A., Rymuza Z., Jarzabek D. *Int. J. Mat. Res. (formerly Z. Metallkd.)*. 2009, vol. 100, no. 7, pp. 933–935.
10. Kravchuk A. S., Kravchuk A. I. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Don engineering bulletin]. 2018, no. 3. Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5173> (accessed Jul. 24, 2019). [In Russian]
11. Kravchuk A. S., Kravchuk A. I. *Perspektivy nauki* [Prospects of science]. 2018, no. 9 (108), pp. 12–22. [In Russian]

---

#### **Кравчук Александр Степанович**

доктор физико-математических наук,  
доцент, ведущий научный сотрудник  
лаборатории динамики систем  
и механики материалов, Научно-  
исследовательский политехнический  
институт – филиал Белорусского  
национального технического  
университета (Республика Беларусь,  
г. Минск, проспект Независимости, 65)

E-mail: [ask\\_belarus@inbox.ru](mailto:ask_belarus@inbox.ru)

#### **Kravchuk Aleksandr Stepanovich**

Doctor of physical and mathematical  
sciences, associate professor,  
leading researcher, laboratory of systems  
dynamics and materials mechanics,  
Research Polytechnic Institute - a branch  
of Belarusian National Technical  
University (65 Nezavisimosty avenue,  
Minsk, the Republic of Belarus)

**Кравчук Анжелика Ивановна**

кандидат физико-математических наук,  
доцент, кафедра веб-технологий  
и компьютерного моделирования,  
Белорусский государственный  
университет (Республика Беларусь,  
г. Минск, проспект Независимости, 4)

**Kravchuk Anzhelika Ivanovna**

Candidate of physical and mathematical  
sciences, associate professor,  
sub-department of web technologies  
and computer simulation, Belarusian  
State University (4 Nezavisimosty  
avenue, Minsk, the Republic of Belarus)

E-mail: anzhelika.kravchuk@gmail.com

---

**Образец цитирования:**

Кравчук, А. С. Уточненная теория определения параметров пластического течения материала при сжатии по измеренной твердости по Мейеру / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 98–111. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-8.

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Большое влияние на эксплуатационные свойства восстанавливаемых деталей автомобилей оказывает формирование и строение поверхностного слоя, характеристики которого зависят от протекающих при обработке процессах. При обработке деталей, восстановленных методом электродуговой наплавки под слоем флюса, одним из основных показателей эксплуатационных свойств поверхностного слоя является микротвердость, которая является следствием тепловых процессов, протекающих в поверхностном слое детали. На характер тепловых и силовых явлений при лезвийной обработке большое влияние оказывает способ охлаждения зоны резания. Влияние различных способов охлаждения зоны резания на тепловые процессы и на свойства поверхностного слоя изучено не достаточно. Целью работы является выявление влияния способа охлаждения на микротвердость поверхностного слоя восстановленных методом наплавки деталей после обработки.

*Материалы и методы.* Исследования температурных процессов в зоне резания осуществлялись путем получения картины тепловых полей тепловизором NEC G120 и анализом с использованием специального программного обеспечения Thermography Studio. Оценка физико-механических характеристик поверхностного слоя проводилась методом измерения микротвердости.

*Результаты.* Выявлено влияние способа охлаждения на глубину упрочненного слоя. Определена закономерность распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя после лезвийной обработки при различных способах охлаждения. Определены температуры зоны резания в процессе лезвийной обработки восстановленных методом наплавки деталей при охлаждении зоны резания различными способами.

*Выводы.* Охлаждение аэрозольными водно-масляными технологическими средами позволяет обеспечить более эффективное охлаждение зоны резания (в сравнении с подачей поливом) при лезвийной обработке восстановленных методом наплавки деталей. Выявлено, что на глубину упрочненного слоя метод охлаждения не оказывает значительного влияния. Способ подачи охлаждающих сред влияет на характер распределения микротвердости по глубине деформированного слоя.

**Ключевые слова:** обработка, микротвердость, наклеп, температура резания, смазочно-охлаждающая технологическая среда, аэрозоль, наплавка, ремонт, восстановление, транспортные машины.

N. E. Kurnosov, Yu. A. Zakharov, A. A. Nikolotov

## IMPROVING THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER FOR THE MACHINING OF RESTORED PARTS OF TRANSPORT MACHINES

### Abstract.

*Background.* The formation and structure of the surface layer, the characteristics of which depend on the processes occurring during processing, have a great influence on the operational properties of the restored car parts. When processing parts restored by the method of electric arc surfacing under a flux layer, one of the main indicators of the operational properties of the surface layer is microhardness, which is a consequence of the thermal processes occurring in the surface layer of the part. The nature of thermal and power phenomena during blade cutting is greatly influenced by the method of cooling the cutting zone. The influence of various methods of cooling the cutting zone on thermal processes and on the properties of the surface layer is not well understood. The aim of the work is to identify the effect of the cooling method on the microhardness of the surface layer of the parts restored after surfacing after processing.

*Materials and methods.* Investigations of temperature processes in the cutting zone were carried out by obtaining a picture of thermal fields with a NEC G120 thermal imager and analysis using special Thermography Studio software. The physico-mechanical characteristics of the surface layer were evaluated by the method of microhardness measurement.

*Results.* The effect of the cooling method on the depth of the hardened layer is revealed. The regularity of the distribution of microhardness over the depth of the surface layer after blade processing with various cooling methods is determined. The temperatures of the cutting zone in the process of blade processing of the parts restored by surfacing were determined while cooling the cutting zone in various ways.

*Conclusions* Cooling by aerosol water-oiled technological fluids allows more efficient cooling of the cutting zone (as compared with irrigation feed) during blade cutting of parts restored by surfacing. It was revealed that the cooling method does not have a significant effect on the depth of the hardened layer. The method of supplying cooling media affects the nature of the distribution of microhardness along the depth of the deformed layer.

**Keywords:** manufacture, micro hardness, hardening, cutting temperature, lubricating and cooling agents, aerosol, surfacing, repair, restoration, transport machines.

### Введение

В процессе эксплуатации значительная часть деталей транспортных машин находится во фрикционном взаимодействии, что приводит к изнашиванию, а следовательно, и к изменению размеров и формы сопрягаемых деталей. Основным способом восстановления размеров и формы деталей является нанесение ремонтных покрытий (наплавка, напыление, гальваническое осаждение и др.) с последующей механической обработкой. Большое влияние на эксплуатационные свойства восстанавливаемых деталей автомобилей оказывает формирование и строение поверхностного слоя, расположенного под обработанной поверхностью и контактирующего с сопряженной деталью в процессе эксплуатации. Силы резания и нагрев, сопровождающие процесс

резания, вызывают пластическую деформацию тонких поверхностных слоев, расположенных под обработанной поверхностью. Процессы, происходящие в поверхностных слоях, связаны с наклепом и разупрочнением, с повышением микротвердости, образованием остаточных напряжений и оказывают решающее влияние на эксплуатационные свойства деталей [1]. Так, к примеру, повышению износостойкости деталей в большинстве случаев способствует предварительное упрочнение поверхностного слоя металла, которое уменьшает смятие и истирание поверхностей при наличии их непосредственного контакта [2]. Высокая твердость и прочность поверхностного слоя после наплавки приводит к возникновению высоких сил резания и температуры при обработке, что при отсутствии эффективного теплоотвода приводит к разупрочнению поверхностных слоев. Традиционным способом снижения теплонапряженности процесса механической обработки является подача охлаждающих сред в зону резания методом полива или под давлением.

Наплавленный металл по своему сечению имеет неоднородные физико-механические свойства, химический состав и микроструктуру. Механические свойства наплавленного металла значительно превосходят таковые у нормализованной стали, что приводит к иным уровням скоростей резания [3]. Кроме того, обработка восстановленных деталей сопряжена с высоким тепловыделением, прерывистым резанием и значительными силами резания, что вызывает необходимость применения высокоэффективных составов смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), что приводит к заметному удорожанию ремонта. Поиск путей снижения затрат на обеспечение высокого качества обработки привел к необходимости минимизации количества подаваемых СОТС: так называемая технология MQL (Minimum Quantity Lubrication) [4] заключается в подаче в зону обработки небольших количеств жидких СОТС в аэрозольном виде. MQL-технология позволяет решать задачи снижения температуры обработки за счет использования испарительного охлаждения, а также эффективной смазки трущихся поверхностей благодаря высокой проникающей способности летящих с высокой скоростью мелкодисперсных капель.

### **1. Методика исследования**

Для оценки эффективности охлаждения зоны резания при использовании различных способов подачи СОТС было проведено исследование распределения температуры по поверхности обрабатываемой детали.

Для исследования были подготовлены образцы деталей в виде цилиндров диаметром 80 мм и длиной 250 мм из стали 45. На поверхность деталей методом электродуговой наплавки под слоем флюса были нанесены восстанавливающие покрытия толщиной до 5 мм. В процессе проведения исследования образцы деталей протачивались на токарно-винторезном станке модели 16К20. При обработке зона резания охлаждалась поливом, подачей аэрозольных водно-масляных СОТС, и осуществлялась обработка без охлаждения. При чистовой обработке применялись резцы с наплавляемой пластиной Т30К4 с геометрией режущей части:  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\lambda = -2^\circ$ . Для чернового точения использовался резец со сменной неперетачиваемой пластиной из сплава Т5К10. Геометрия режущей части при черновом точении:  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\lambda = 4^\circ$ ,  $f = 0,2$  мм.

В соответствии с рекомендациями [5] при обработке выдерживались следующие режимы обработки:

- черновое точение:  $t = 2,5$  мм,  $s = 0,5$  мм/об,  $v = 150$  м/мин;
- чистовое точение:  $t = 0,5$  мм,  $s = 0,2$  мм/об,  $v = 215$  м/мин.

Получение картины тепловых полей в зоне резания осуществлялось тепловизором NEC G120 с максимальной температурой измерения до 1500 °С. Полученные термограммы обрабатывались и анализировались с помощью специального программного обеспечения – Thermography Studio 5.1.0.902.

Оценка физико-механических характеристик поверхностных слоев восстановленной детали проводилась с помощью измерения микротвердости  $H\mu$  по глубине поверхностного слоя на косых шлифах под углом 2° микротвердомером ПМТ-3 методом восстановленного отпечатка при нагрузке 100 г и времени выдержки 15 с [6]. Использовался алмазный индентор с углом при вершине между противоположными гранями 136°.

Измерения микротвердости выполнялись в следующей последовательности:

- выбиралось место первого внедрения индентора на расстоянии не менее 5 мм от края образца для устранения искажений результатов, вызванных смятием кромки;
- затем проводили последовательное внедрение индентора вдоль оси образца с таким расчетом, чтобы расстояние между отпечатками составляло не менее одной диагонали и получался ряд из не менее пяти отпечатков;
- образец смещался перпендикулярно оси образца и выполнялся еще ряд измерений;
- продвижение перпендикулярно оси образца продолжалось до тех пор, пока последние три ряда отпечатков не показали разницу средних значений длины диагоналей, не превышающую 3 %.

При охлаждении зоны резания поливом использовался эмульсол при подаче свободно падающей струей с расходом 15 л/мин. Аэрозольные водно-масляные СОТС подавались (методика получения и подачи представлена [7]) в соотношении масляной и водной фракций 1:20 с общим расходом жидких компонентов аэрозоля 200 г/ч.

## 2. Результаты исследований

Полученные с тепловизора термограммы показывают конфигурацию тепловых полей на поверхностях обрабатываемой детали и инструмента (рис. 1).

В табл. 1 приведены результаты исследования распределения температур в зоне резания при различных способах охлаждения.

Термограммы показывают, что эффективность охлаждения зоны резания аэрозольными СОТС выше, чем при охлаждении поливом. Проникновение мелкодисперсных капель в зону резания обеспечивает снижение температуры детали, о чем свидетельствуют результаты обработки термограмм. Необходимо отметить, что стружка имеет температуру в 5–6 раз большую, чем инструмент и деталь, это вносит значительный вклад в теплоотвод из зоны резания.

Анализ термограмм показывает, что картина чистового точения принципиально не отличается от чернового. Также наблюдается высокая темпера-

тура с зоне взаимодействия, значительная часть тепла уносится стружкой. Основным отличием является более низкая теплонапряженность процесса из-за значительного снижения величины срезаемого слоя.



Рис. 1. Пример термограммы зоны резания

Таблица 1

Термограммы зоны резания при продольном точении восстановленных деталей (черновая обработка)

Способ охлаждения	Средняя температура при черновой обработке $T$ , °C	Средняя температура при чистовой обработке $T$ , °C
Без охлаждения	814	418
СОЖ в виде аэрозоля	423	298
Полив эмульсией	491	357

Проведенное исследование показало, что аэрозольные водно-масляные СОТС обеспечивают эффективное охлаждение зоны резания, это позволяет оказывать влияние на формирование поверхностных слоев детали.

Результаты исследования влияния метода охлаждения при продольном точении на глубину упрочненного слоя металла приведены в табл. 2 и 3.

Исследование показало, что глубина упрочненного слоя зависит от применения СОТС, при обработке без использования СОТС наблюдается увеличение глубины упрочненного слоя, что связано с более высокой степенью пластической деформации поверхностного слоя. Применение СОТС позволяет снизить глубину упрочненного слоя за счет снижения коэффициента трения детали по задней поверхности резца. В целом величина изменения толщины упрочненного слоя при различных методах смазки и охлаждения зоны резания незначительна.

Таблица 2

Глубина упрочненного слоя  $h_c$ , мм, при охлаждении (черновое точение)

Аэрозольные СОТС	Полив СОТС	Без охлаждения
0,356	0,354	0,415
0,374	0,367	0,411
0,352	0,37	0,421
Средние значения глубины поверхностного слоя		
0,361	0,364	0,416

Таблица 3

Глубина упрочненного слоя  $h_c$ , мм, при охлаждении (чистовое точение)

Аэрозольные СОТС	Полив СОТС	Без охлаждения
0,027	0,03	0,032
0,031	0,028	0,039
0,028	0,029	0,034
Средние значения глубины поверхностного слоя		
0,029	0,029	0,035

Более показательным для оценки влияния способа охлаждения зоны резания является распределение микротвердости по глубине деформированного слоя (рис. 2, 3).

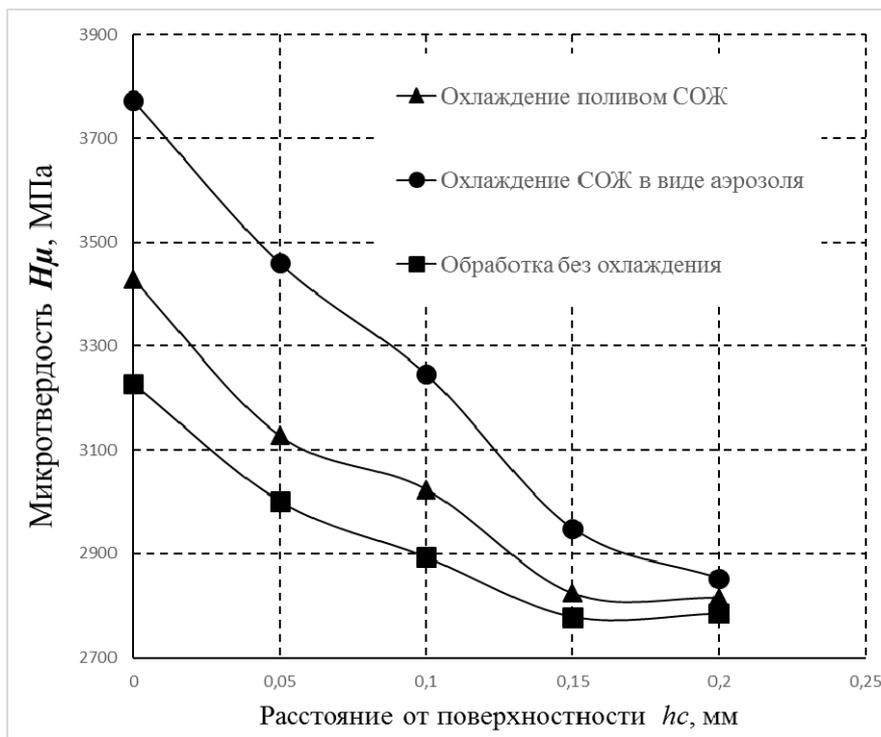


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине при черновой обработке

При применении охлаждения формирование деформированного слоя зависит от одновременного протекания двух процессов: пластической дефор-

мации в результате взаимодействия детали и инструмента и тепловой деформации в результате локального нагрева детали при резании. Использование СОТС влияет как на процесс деформации, снижая силы трения при резании за счет реализации смазывающих свойств СОТС, так и на тепловую деформацию детали, снижая нагрев детали и предотвращая фазовые изменения структуры металла.

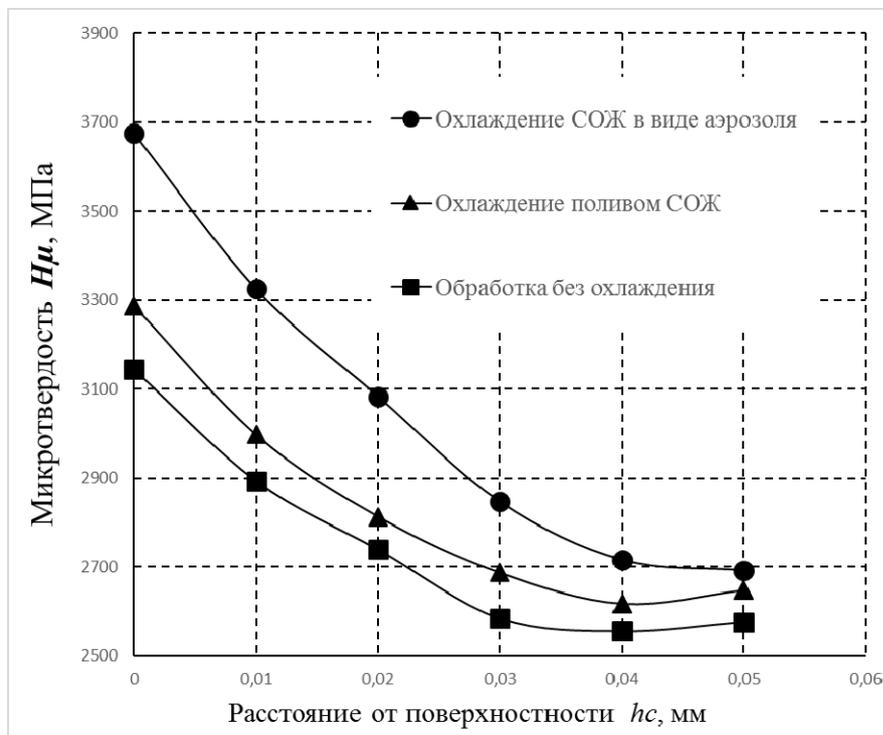


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине при чистовой обработке

Исследования показали, что при обработке происходит формирование на поверхности обработанной детали упрочненного слоя толщиной до 0,1 мм (рис. 2). При этом использование СОТС позволяет увеличить твердость этого слоя на 13–16 %. Выявленное влияние СОТС на характер распределения микротвердости по глубине деформированного слоя показывает, что при черновой обработке преобладает упрочнение за счет изменения структуры металла при интенсивном нагреве и быстром охлаждении.

Картина распределений микротвердости при чистовом точении показывает, что основным процессом возникновения наклепа является пластическая деформация поверхностных слоев металла. На это указывает некоторое снижение упрочнения при введении СОТС из-за уменьшения трения.

### Заключение

Проведенное исследование показало:

1. Охлаждение аэрозольными водно-масляными СОТС позволяет обеспечить более эффективное (на 13,8 % при черновой обработке и на 16,5 % при чистовой обработке) в сравнении с подачей СОТС поливом охлаждение зоны

резания при лезвийной обработке восстановленных методом наплавки деталей.

2. Выявлено, что на глубину упрочненного слоя метод охлаждения не оказывает значительного влияния.

3. Способ подачи охлаждающих сред влияет на характер распределения микротвердости по глубине деформированного слоя. Охлаждение аэрозольными водно-масляными СОТС позволяет получать на 9–11 % большие значения микротвердости, чем при охлаждении поливом, и на 13–16 % больше по сравнению с сухим резанием.

#### Библиографический список

1. Восстановление деталей машин : справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов ; под ред. В. П. Иванова. – Москва : Машиностроение, 2003. – 672 с.
2. Маталин, А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – Киев : Техника, 1971. – 144 с.
3. Воловик, Е. Л. Справочник по восстановлению деталей / Е. Л. Воловик. – Москва : Колос, 1981. – 351 с.
4. Потапов, В. А. Применение механической обработки с минимальным количеством СОЖ на Германских заводах / В. А. Потапов // Машиностроитель. – 1999. – № 11. – С. 46–52.
5. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / гл. ред. А. М. Дальский ; под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2001.
6. Харитонов, Л. Г. Определение микротвердости / Л. Г. Харитонов. – Москва : Metallurgiya, 1967. – 48 с.
7. Курносоев, Н. Е. Методика оценки охлаждающей способности распыленных СОТС / Н. Е. Курносоев, А. А. Николотов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 2 (10). – С. 166–175.

#### References

1. Panteleenko F. I., Lyalyakin V. P., Ivanov V. P., Konstantinov V. M. *Vosstanovlenie detaley mashin: spravochnik* [Car parts restoring: reference book]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 672 p. [In Russian]
2. Matalin A. A. *Tekhnologicheskie metody povysheniya dolgovechnosti detaley mashin* [Technological methods of car parts' lifespan improvement]. Kiev: Tekhnika, 1971, 144 p.
3. Volovik E. L. *Spravochnik po vosstanovleniyu detaley* [Part restoration handbook]. Moscow: Kolos, 1981, 351 p. [In Russian]
4. Potapov V. A. *Mashinostroitel* [Machine builder]. 1999, no. 11, pp. 46–52. [In Russian]
5. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya T. 2* [A handbook of a specialist in machine building. Vol. 2]. Editor-in-chief A. M. Dalsky; eds. A. G. Kosilovoy, R. K. Meshcheryakova, A. G. Suslova; 5th ed., rev. and suppl. Moscow: Mashinostroenie, 2001. [In Russian]
6. Kharitonov L. G. *Opreделение mikrotverdosti* [Microhardness determination]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 48 p. [In Russian]
7. Kurnosov N. E., Nikolotov A. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 2 (10), pp. 166–175. [In Russian]

***Курносов Николай Ефимович***

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

E-mail: TTMO-PGU@mail.ru

***Kurnosov Nikolay Efimovich***

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

***Захаров Юрий Альбертович***

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой эксплуатации  
автомобильного транспорта, Пензенский  
государственный университет  
архитектуры и строительства (Россия,  
г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)

E-mail: avto@pguas.ru

***Zakharov Yuriy Al'bertovich***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, head of sub-department  
of road transport operation,  
Penza State University of Architecture  
and Construction (28 Germana Titova  
street, Penza, Russia)

***Николотов Андрей Александрович***

старший преподаватель, кафедра  
транспортных машин, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Nikolotov@mail.ru

***Nikolotov Andrey Aleksandrovich***

Senior lecturer, sub-department  
of transport machines, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Курносов, Н. Е. Повышение качества поверхностного слоя при обработке восстановленных деталей транспортных машин / Н. Е. Курносков, Ю. А. Захаров, А. А. Николотов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 112–120. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-9.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ С НАНОМОДИФИЦИРОВАННОЙ СМАЗОЧНО- ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Функциональные характеристики деталей машин во многом определяются свойствами их поверхности. Особую роль играет дефектная структура поверхности, которая в большинстве случаев является причиной усталостного разрушения металла. В этой связи задача разработки технологий модифицирования дефектной структуры поверхности деталей становится весьма актуальной. Цель данной работы заключается в теоретическом и экспериментальном обосновании возможности использования наномодифицированной смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в условиях развития кавитации как упрочняющей технологии формирования износостойких поверхностных слоев.

*Материалы и методы.* Для расчета времени схлопывания кавитационного пузырька использовалось уравнение Нолтинга – Непайреса. Расчет числа наночастиц металла, попадающих в каналы микротрещин (МТ) за счет действия кумулятивной струи, выполнен с использованием закона сохранения энергии. Расчет эффективного модуля Юнга поверхностного слоя металла выполнен с помощью формулы, полученной путем модификации формулы для модуля Юнга пористого материала. Для экспериментальных исследований влияния наномодифицированной СОЖ на характеристики поверхности использовались лопатки турбокомпрессора, материал образцов – сплав ЖС6К. Обработка образцов проводилась на плоскошлифовальном станке высокопористыми кругами.

*Результаты.* В приближении несжимаемой жидкости и в пренебрежении вязкими потерями получена аналитическая формула для времени схлопывания кавитационного пузырька. Показано, что время схлопывания кавитационного пузырька зависит от частоты вибрации, радиуса пузырька, плотности СОЖ, амплитуды колебаний давления в жидкости, а также от декремента затухания. С учетом выявленных ограничений на приведенные параметры установлено, что наиболее эффективной с точки зрения влияния кумулятивной струи является величина времени схлопывания  $\geq 10^{-8}$  с. Получена аналитическая формула для расчета числа наночастиц металла, попадающих в каналы микротрещин за счет действия кумулятивной струи. Проведена оценка числа наночастиц, оказавшихся в МТ; показано, что эта величина существенно зависит от времени схлопывания кавитационного пузырька и геометрических параметров МТ. Получена аналитическая формула для эффективного модуля Юнга поверхностного слоя металла. Показано, что эффективный модуль Юнга является

ся функцией числа наночастиц, попавших в канал МТ, а также размера наночастиц и МТ. Проведенная оценка показала, что эффективный модуль Юнга в зависимости от величины времени схлопывания кавитационного пузырька может превышать свою начальную величину примерно на порядок. Выявлено качественное соответствие теоретических результатов результатам эксперимента: при использовании СОЖ с наночастицами Ni при шлифовании образцов лопатки турбокомпрессора было достигнуто снижение шероховатости поверхности по параметру  $R_a$  на 10 % и повышение микротвердости поверхности более чем на 20 %.

*Выводы.* Путем использования кавитационных технологий для модифицирования дефектной структуры поверхности в процессе финишной обработки можно обеспечить требуемые прочностные характеристики поверхностного слоя металла.

**Ключевые слова:** кавитационная технология, наномодифицированная смазочно-охлаждающая жидкость, время схлопывания кавитационного пузырька, наночастицы металла, эффективный модуль Юнга поверхностного слоя металла, шероховатость, микротвердость.

*N. P. Simonov*

### **APPLYING THE CAVITATION TECHNOLOGY WITH NANOMODIFIED LUBRICANT-COOLING LIQUID TO INCREASE THE STRENGTH OF THE SURFACE LAYER WHEN FINISHING CONSTRUCTIONAL MATERIALS**

*Background.* The functional characteristics of machine parts are largely determined by the properties of their surface. A special role is played by the defective structure of the surface, which in most cases is the cause of the fatigue failure of metal. In this regard, the task of developing technologies for modifying the defective structure of the surface of parts becomes very urgent. The aim of this work is to theoretically and experimentally substantiate the possibility of using nanomodified cutting fluid in the conditions of cavitation development as a strengthening technology for the formation of wear-resistant surface layers.

*Materials and methods.* To calculate the time of the collapse of the cavitation bubble, the Nolting-Nepires equation was used. The calculation of the number of metal nanoparticles falling into the channels of microcracks (MC) due to the action of the cumulative jet was performed using the energy conservation law. The calculation of the effective Young's modulus of the surface layer of metal was performed using the formula obtained by modifying the formula for the Young's modulus of a porous material. For experimental studies of the effect of nanomodified coolant on the surface characteristics, turbocharger blades were used, the sample material was ZhS6K alloy. The samples were processed on a surface grinding machine with highly porous circles.

*Results.* In the approximation of an incompressible fluid and neglecting viscous losses, an analytical formula has been obtained for the time of collapse of a cavitation bubble. It is shown that the collapse time of a cavitation bubble depends on the vibration frequency, bubble radius, coolant density, amplitude of pressure fluctuations in the liquid, and also on the damping decrement. Taking into account the identified limitations on the given parameters, it was found that the collapse time  $\geq 10^{-8}$  s is most effective from the point of view of the influence of the cumulative

jet. An analytical formula has been obtained for calculating the number of metal nanoparticles falling into the channels of microcracks due to the action of a cumulative jet. The number of nanoparticles trapped in MCs was estimated; it is shown that this value substantially depends on the time of collapse of a cavitation bubble and the geometric parameters of MCs. An analytical formula has been obtained for the effective Young's modulus of the metal surface layer. It is shown that the effective Young's modulus is a function of the number of nanoparticles entering the MC channel, as well as the size of the nanoparticles and MCs. The assessment showed that the effective Young's modulus, depending on the value of the time of collapse of a cavitation bubble, could exceed its initial value by about an order of magnitude. A qualitative agreement was found between theoretical results and experimental results: when using coolant with Ni nanoparticles when grinding samples of a turbo-compressor blade, a 10% decrease according to  $R_a$  parameter in surface roughness and an increase in surface microhardness by more than 20% were achieved.

*Conclusions.* By using cavitation technologies to modify the defective structure of the surface during finishing, it is possible to provide the required strength characteristics of the surface layer of metal.

**Keywords:** cavitation technology, nano-modified cutting fluid, time of collapse of a cavitation bubble, metal nanoparticles, effective Young's modulus of the surface metal layer, roughness, microhardness.

### Введение

Важной задачей современного машиностроения является обеспечение надежности, долговечности и стабильности устройств и узлов машин разного назначения. Известно [1], что функциональные характеристики деталей определяются свойствами их поверхности. В этой связи становится актуальной разработка технологий поверхностного модифицирования конструкционных материалов. Особое внимание привлекает дефектная структура поверхности, которая при определенных условиях может служить причиной усталостного разрушения металла. Основными дефектами поверхностного слоя являются микротрещины (МТ), инородные включения, повышенная пористость и т.д. В настоящее время активно используются такие методы управления свойствами поверхности, как нанесение покрытий, легирование поверхности и модификация структуры поверхностного слоя [1].

Недавно нами был предложен кавитационный механизм управления качеством поверхностного слоя ферритовых деталей при использовании смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) с нанодобавками в условиях звукокапиллярного эффекта [2]. Основной целью было продемонстрировать возможность целенаправленного снижения хрупкости поверхностного слоя при финишной обработке ферритовых деталей. Было показано [2], что в случае достаточно плотной регулярной цепочки МТ эффективный модуль Юнга поверхностного слоя ферритовых деталей определяется в основном модулем Юнга материала наночастиц в СОЖ, что дает возможность изменять хрупкость поверхностного слоя за счет подбора необходимого материала для наночастиц. В настоящей работе решается задача об упрочнении поверхностного слоя металла путем использования кавитационных технологий для модифицирования дефектной структуры поверхности в процессе финишной обработки конструкционного материала. Цель данной работы заключается в теоретическом и экспериментальном обосновании возможности использования

наномодифицированной СОЖ в условиях развития кавитации как упрочняющей технологии формирования износостойких поверхностных слоев.

### 1. Механизм влияния наномодифицированной СОЖ в условиях образования кавитационных пузырьков

Кавитация играет важную роль в эффекте проникновения наномодифицированной СОЖ в каналы МТ. Кавитация может быть реализована в среде СОЖ за счет ударного взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью, в результате чего образуются импульсные волны напряжений, которые распространяются по абразивным зернам, а затем передаются в жидкость. Вследствие этого в зоне обработки технологическая жидкость совершает колебательные движения, что способствует развитию кавитационных процессов. Схлопывание кавитационных пузырьков вблизи поверхностного слоя приводит к образованию кумулятивных струй, которые стимулируют проникновение технологической жидкости с наночастицами в каналы МТ (рис. 1).

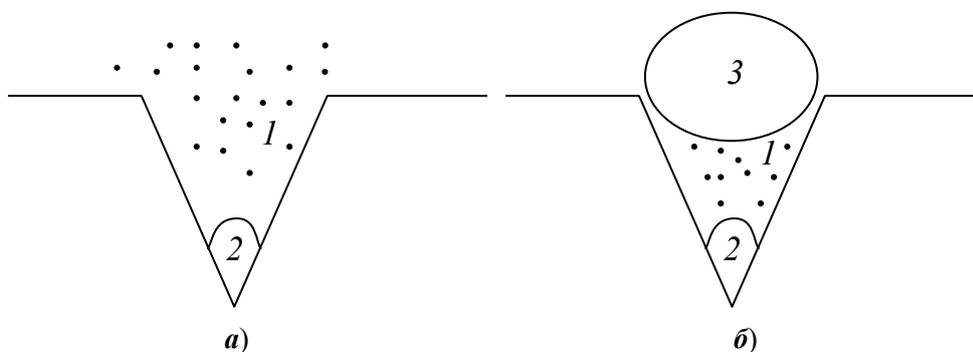


Рис. 1. Схематическое изображение канала МТ на поверхности металла: *а* – канал МТ, заполненный СОЖ (1) за счет капиллярного эффекта до начала развития кавитации, 2 – воздушный пузырек; *б* – канал МТ с кавитационным пузырьком 3

В результате МТ поверхностного слоя металла заполняются наночастицами, что приводит к изменению эффективного модуля Юнга поверхности. Как известно [3], наномодифицированные технологические жидкости значительно понижают коэффициент трения в зоне обработки, соответственно понижают тангенциальную силу шлифования, в результате возрастает эффективность процесса шлифования. Как будет показано ниже, использование наномодифицированной СОЖ в сочетании с кавитационными процессами может составить основу упрочняющей технологии формирования износостойких поверхностных слоев.

### 2. Расчет времени схлопывания кавитационного пузырька

Время схлопывания кавитационного пузырька  $t_c$  – это фактически время действия кумулятивной струи у устья МТ, поэтому расчет  $t_c$  является достаточно актуальным для рассмотрения баланса энергий между СОЖ и кавитационным пузырьком.

Рассмотрим уравнение Нолтинга – Непайреса, описывающее пульсации кавитационного пузырька [4]:

$$R \cdot \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 + \frac{1}{\rho_0} \left( p_0 - p_{vap} + \frac{2\sigma}{R} + p_m \sin \omega t - \left( p_0 - p_{vap} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \cdot \left( \frac{R}{R_0} \right)^{-3\gamma} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения; давление внутри пузырька складывается из давления газа и давления пара  $p_{vap}$ ;  $2\sigma/R$  – капиллярное давление Лапласа, которое оказывает искривленная поверхность пузырька на имеющийся в нем газ;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $R_0$  – радиус пузырька;  $\omega$  – частота вибраций;  $p_m$  – амплитуда колебаний давления в жидкости;  $p_0$  – атмосферное давление;  $\rho_0$  – плотность жидкости.

Как показывают оценки [4], во многих случаях давлением пара и поверхностным натяжением можно пренебречь, тогда уравнение (1) упрощается:

$$R \cdot \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 + \frac{1}{\rho_0} \left[ p_m \sin \omega t + p_0 \cdot \left( 1 - \left( \frac{R}{R_0} \right)^{-3\gamma} \right) \right] = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) получено также в пренебрежении сжимаемостью жидкости и вязкими потерями. Дальнейшее упрощение, связанное с пренебрежением нелинейными членами, приводит уравнение к виду [4]:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = -\frac{p_m}{\rho_0 R_0} \sin \omega t, \quad (3)$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho_0}}$  – резонансная частота;  $x = R - R_0$ .

Уравнение (3) хорошо известно, оно описывает вынужденные линейные колебания системы в бездиссипативной среде.

Решение уравнения (3) можно представить в виде

$$x(t) = -\frac{p_m}{\rho_0 R_0} \cdot \frac{\sin(\omega t + \varphi)}{\omega_0^2 \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + (\delta \cdot \Omega)^2}}, \quad (4)$$

где  $\Omega = \omega / \omega_0$ ;  $\text{tg } \varphi = -\delta \cdot \Omega / (1 - \Omega^2)$ ;  $\delta$  – декремент затухания.

Продифференцируем обе части (4) по времени:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{p_m}{\rho_0 R_0} \cdot \frac{\omega \cdot \cos(\omega t + \varphi)}{\omega_0^2 \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + (\delta \cdot \Omega)^2}}; \quad (5)$$

пусть  $y = x / R_0$ , тогда

$$R_0 dy = -\frac{p_m}{\rho_0 R_0} \cdot \frac{\omega \cdot \cos(\omega t + \varphi)}{\omega_0^2 \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + (\delta \cdot \Omega)^2}} dt. \quad (6)$$

Проинтегрируем обе части (6):

$$R_0 \int_0^{-1} dy = -\frac{p_m}{\rho_0 R_0} \cdot \frac{\omega}{\omega_0^2 \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + (\delta \cdot \Omega)^2}} \int_0^{t_c} \cos(\omega t + \varphi) dt,$$

в результате для  $t_c$  получим

$$t_c = \frac{1}{\omega} \arcsin \left[ \frac{\omega_0^2 R_0^2 \rho_0}{p_m} \sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + (\delta \cdot \Omega)^2} + \sin \varphi \right] - \frac{\varphi}{\omega}. \quad (7)$$

Оценка величины  $t_c$  при следующих значениях параметров, входящих в (7):  $R_0 = 10^{-6}$  м,  $p_0 = 10^5$  Па,  $\rho_0 = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma = 1,4$ ,  $\delta = 0,1$ , дает  $t_c \approx 10^{-8}$  с, при этом приведенные параметры связаны ограничением вида

$$\left| \frac{\omega_0^2 R_0^2 \rho_0 \delta}{p_m} \Omega + \sin \varphi \right| \leq 1. \quad (8)$$

### 3. Расчет числа наночастиц металла, попадающих в каналы микротрещин за счет действия кумулятивной струи

Необходимо отметить, что процесс образования кавитационных пузырьков носит случайный характер. В этой связи на первом этапе обработки поверхности металла каналы МТ заполняются СОЖ за счет капиллярного эффекта, а затем, по мере развития кавитационного процесса, срабатывает «эффект кумулятивных струй». Используя закон сохранения энергии, выполним расчет числа наночастиц металла, попадающих в каналы МТ:

$$W = E_K + A_C, \quad (9)$$

где  $W = 4\pi R_{\max}^3 \cdot p_0 / 3$  – средняя энергия, запасенная в кавитационном пузырьке;  $R_{\max}$  – максимальный радиус кавитационного пузырька;  $A_C$  – работа сил трения в процессе проникновения наночастиц металла в каналы МТ:  $A_C = \mu \rho_H g L_{MT}$ , здесь  $\mu$  – коэффициент трения;  $\rho_H$  – плотность материала наночастиц;  $L_{MT}$  – средняя длина МТ;  $E_K$  – кинетическая энергия струи СОЖ:

$$E_K = N_H \rho_H \frac{4}{3} \pi r_H^3 \frac{v^2}{2},$$

здесь  $N_H$  – число наночастиц, попавших в канал МТ;  $r_H$  – средний радиус наночастицы;  $v$  – средняя скорость струи СОЖ:  $v = L_{MT} / t_c$ .

В результате для  $N_H$  получим

$$N_H = \frac{8R_{\max}^3 \cdot p_0 - \rho_0 L_{MT}^3 (r_0 / t_c)^2}{8r_H^3 \left( \frac{1}{2} \rho_H \cdot \left( \frac{L_{MT}}{t_c} \right)^2 + \mu \rho_H g L_{MT} \right)}. \quad (10)$$

Формула (10) справедлива при выполнении неравенства

$$t_c \geq r_0 \sqrt{\frac{\rho_0 L_{MT}^3}{8R_{\max}^3 p_0}},$$

где  $r_0$  – радиус устья МТ;  $\rho_0$  – плотность СОЖ.

Оценка величины  $N_H$  при следующих значениях входящих в (10) параметров:  $R_{\max} = 10^{-6}$  м,  $p_0 = 10^5$  Па,  $r_H = 5 \cdot 10^{-8}$  м,  $t_c = 10^{-8}$  с,  $\mu = 0,2$ ,  $L_{MT} = 10^{-6}$  м,  $\rho_H = 8900$  кг/м<sup>3</sup>, – дает  $N_H \approx 16$ , в то время как оценка при плотной упаковке дает  $(N_H)_{\max} = V_{MT} / V_n \approx 20$ ,  $V_n$  – объем одной наночастицы,  $V_n \approx 5 \cdot 10^{-22}$  м<sup>3</sup>,  $V_{MT} \approx 10^{-20}$  м<sup>3</sup>.

Величина  $t_c$  ограничена сверху:  $\omega t_c \ll 1$ , где  $\omega$  – частота вибраций. Действительно, за время, меньшее периода вибраций, кавитационный пузырек должен успеть схлопнуться.

#### 4. Расчет эффективного модуля Юнга

Следует отметить, что эффективный модуль Юнга поверхностного слоя металла  $E_{\text{эф}}$  является, вообще говоря, функцией числа  $N_H$  наночастиц, осевших в каналах МТ. Воспользовавшись формулой для модуля Юнга пористого материала [5], можно получить качественную зависимость  $E_{\text{эф}}(N_H)$ :

$$\frac{E_{\text{эф}}}{E_1} = \frac{4r_H^3}{r_0^2 L_{MT}} \cdot N_H \cdot \left( 1 - \frac{16u_0}{\pi N_{MT}} \right) + \frac{16u_0}{\pi N_{MT}}, \quad (11)$$

где  $r_0$  – радиус основания МТ (геометрическая форма МТ моделируется конусом с высотой равной  $L_{MT}$  и радиусом основания  $r_0$ );  $E_1$  – модуль Юнга в объеме конструкционного материала;  $u_0$  – дисперсия расстояния между МТ;  $N_{MT}$  – число МТ на поверхности металла.

Из формул (11) и (10) видна существенная зависимость  $E_{\text{эф}}$  от времени схлопывания кавитационного пузырька  $t_c$ . Поскольку, в свою очередь,  $t_c$  зависит от параметров вибрации ( $p_m$  и  $\omega$ ), то появляется возможность для управления временем схлопывания кавитационного пузырька, и, следовательно, эффективным модулем Юнга поверхностного слоя металла. Действительно, оценка величины  $E_{\text{эф}} / E_1$  для  $t_c = n \cdot 10^{-8}$  с дает  $E_{\text{эф}} / E_1 \approx 0,8$  при  $n=1$  и  $E_{\text{эф}} / E_1 \approx 64,8$  при  $n=81$ .

Таким образом, варьируя  $t_c$ , можно управлять такими характеристиками поверхности металла, как шероховатость (за счет заполнения наночастицами металла пор и микровпадин) и микротвердость  $H$  (за счет изменения эффективного модуля Юнга) [6]:

$$H = K_1 \sqrt{\frac{E\gamma}{d}} + K_2 \frac{Gb}{d_0} + K_3 \sqrt{\frac{2E\gamma}{L}} + K_4 \gamma, \quad (12)$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $\gamma$  – свободная поверхностная энергия;  $b$  – вектор Бюргерса;  $d, d_0$  – межатомное расстояние и расстояние между атомами в соседних плоскостях сдвига;  $L$  – критический размер МТ;  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – коэффициенты пропорциональности.

Так как  $b \sim 10^{-9}$  м,  $d \sim 10^{-10}$  м,  $L_{MT} \sim 10^{-6}$  м, то наибольший вклад в величину  $H$  даст первое слагаемое, тогда

$$H \approx K_1 \sqrt{\frac{E\gamma}{d}}. \quad (13)$$

С учетом (12) получим

$$\frac{H_2}{H_1} \approx \sqrt{\frac{E_{\text{эф}}}{E_1}}, \quad (14)$$

где  $H_1$  – микротвердость поверхностного слоя металла до обработки;  $H_2$  – микротвердость после модифицирования дефектной структуры поверхностного слоя в процессе обработки с применением наномодифицированной СОЖ.

Оценка величины  $H_2 / H_1$  при тех же значениях параметров, что и выше, дает  $H_2 / H_1 \approx 0,9$  при  $n=1$  и  $H_2 / H_1 \approx 8,5$  при  $n=81$ .

## 5. Эксперимент

Для проверки полученных теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования.

Для формирования кавитационных пузырьков в среде наномодифицированной СОЖ применялась обработка шлифованием с применением наномодифицированной СОЖ. Модифицирование СОЖ проводилось путем добавления в ее состав наночастиц хрома. Концентрация наночастиц составляла 200 на 1 л раствора. Обработке подвергались металлические пластины – образцы плоской формы размерами 25×25×3 мм, которые вырезались из лопаток турбокомпрессора турбоагрегата ТК 34. Материал образцов – сплав ЖС6К. Обработка образцов проводилась на плоскошлифовальном станке высокопористыми кругами ПП(1) 250×32×76 25А 40 ВМ2 12 К 50 класса точности А, 1 кл.

Оценка качества поверхности проводилась посредством измерения следующих характеристик:

- шероховатость поверхности;
- микротвердость поверхности;

– количество микротрещин, приходящееся на единицу площади поверхности.

Шероховатость поверхности образцов измеряли при помощи профилометра-профилографа «Сейтроник ПШ8–4».

Микротвердость поверхности образцов измеряли при помощи микротвердомера модели HNV-G21DT (Shimadzu, Япония).

Количество микротрещин, приходящихся на единицу площади поверхности, оценивалось при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGA3 TESCAN при 921-кратном увеличении. Под микротрещиной (МТ) понималась трещина, имеющая величину раскрытия в диапазоне 0,1–10,0 мкм и длину 5–100 мкм. При подсчете отдельно взятой МТ ее границами признавались места разрыва в поверхностном слое материала либо места ветвления. Схема подсчета количества МТ представлена на рис. 2.

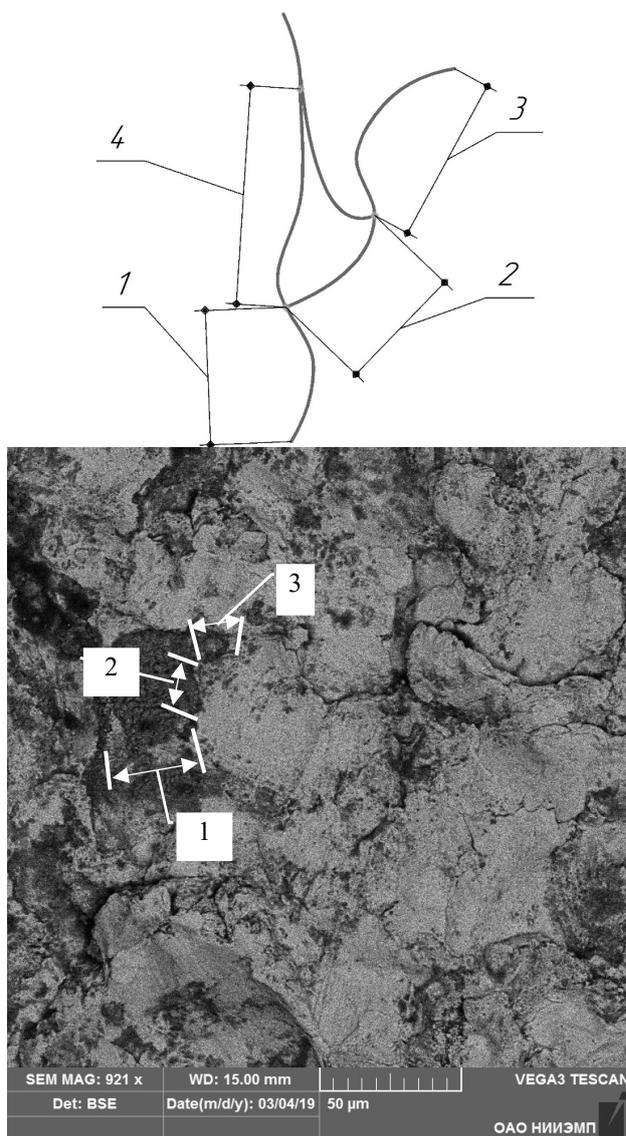


Рис. 2. Схема подсчета количества микротрещин на поверхности образца

Перед проведением экспериментальных исследований была выполнена серия предварительных расчетов с целью проверки характера распределения параметров шероховатости и микротвердости готовых деталей на основе значений, полученных ранее лабораторией АО «Пензадизельмаш». Для обеспечения репрезентативности был выбран метод механической выборки с шагом 10 единиц. Поскольку объем выборки составил 31 единицу, то для проверки нормального характера распределения использовали критерий Шапиро – Уилка.

На основании полученных результатов по формуле был определен минимальный объем выборки  $n_{\min Ra}$  и  $n_{\min HV}$ , равный 5:

$$n_{\min} = \frac{Nt^2\sigma^2}{N\Delta_{\bar{x}}^2 + t^2\sigma^2}, \tag{15}$$

где  $n_{\min}$  – минимальный объем выборки;  $N$  – генеральная совокупность;  $t$  – коэффициент доверия;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение случайной величины;  $\Delta_{\bar{x}}^2$  – предельная ошибка выборочной средней.

Полученные значения шероховатости, микротвердости и количества микротрещин на 10 000 мкм<sup>2</sup> площади поверхности образцов представлены в табл. 1–3 соответственно и на рис. 3–5. Результаты эксперимента показывают, что модифицирование СОЖ наночастицами (НЧ) позволяет при шлифовании добиться снижения шероховатости поверхности по параметру  $Ra$  до 11 %, повышения микротвердости поверхности до 7 % и снижения удельного количества поверхностных микротрещин более чем на 30 %.

Таблица 1  
Значения шероховатости  $Ra$  образцов после шлифования

	Значения шероховатости $Ra$ для образцов, мкм					Среднее значение $Ra$ , мкм	Среднее квадратическое отклонение
	1	2	3	4	5		
Шлифование с применением СОЖ без НЧ	1,16	1,11	1,15	1,22	1,19	1,17	0,042
Шлифование с применением наномодифицированной СОЖ	1,07	1,05	1,08	1,01	0,99	1,04	0,039

Таблица 2  
Значения микротвердости поверхности образцов после шлифования

	Значения микротвердости $HV$ для образцов, ед.					Среднее значение $HV$ , ед.	Среднее квадратическое отклонение
	1	2	3	4	5		
Шлифование с применением СОЖ без НЧ	471	480	485	481	478	479,00	5,148
Шлифование с применением наномодифицированной СОЖ	510	513	517	519	508	513,40	4,615

Таблица 3

Количество микротрещин на 10 000 мкм<sup>2</sup>  
поверхности образцов после шлифования

	Количество микротрещин на поверхности образцов, ед.					Среднее значение, ед.	Среднее квадратическое отклонение
	1	2	3	4	5		
Шлифование с применением СОЖ без НЧ	34	32	43	38	40	37,4	4,450
Шлифование с применением наномодифицированной СОЖ	24	28	21	18	26	23,4	3,975

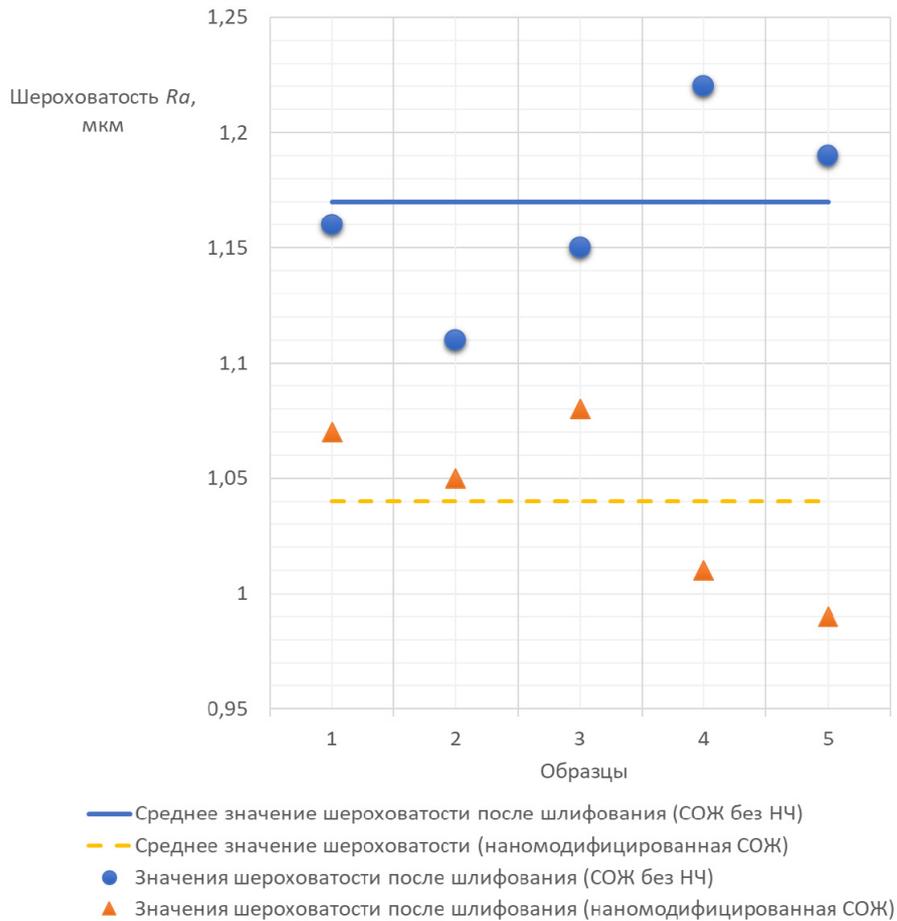


Рис. 3. Распределение значений шероховатости  $R_a$  образцов после шлифования

### Заключение

В работе показано, что время схлопывания кавитационного пузырька зависит от частоты вибрации, радиуса пузырька, плотности СОЖ, амплитуды колебаний давления в жидкости, а также от декремента затухания.

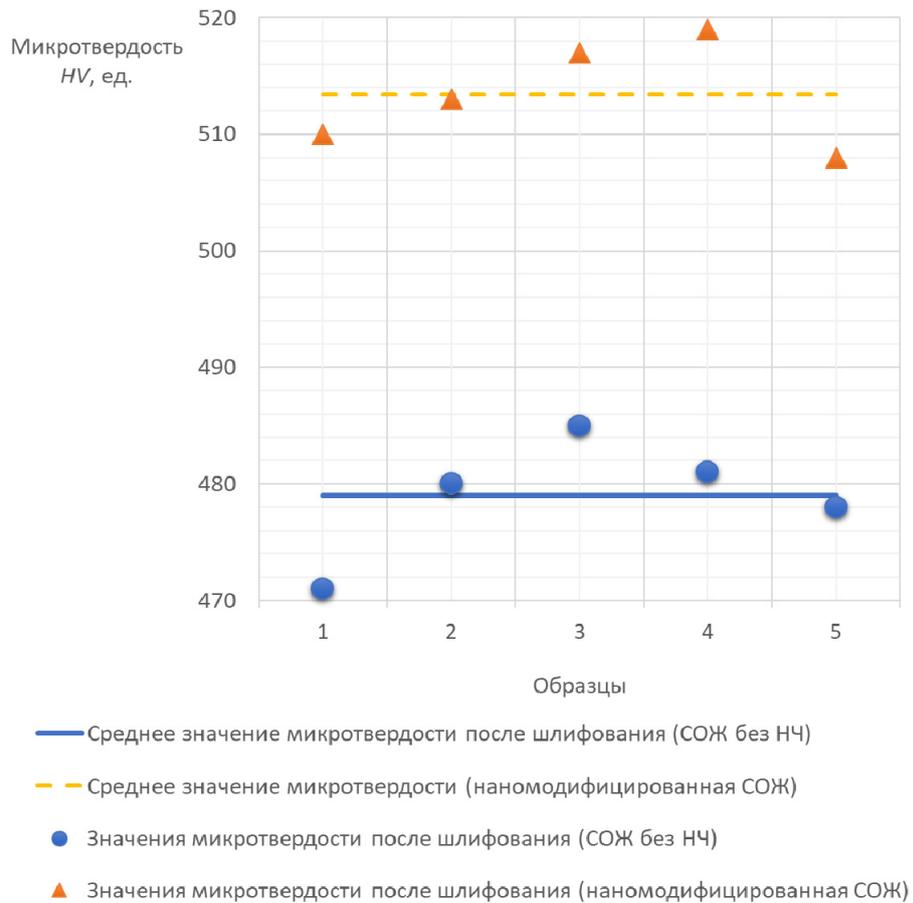


Рис. 4. Распределение значений микротвердости поверхности образцов после шлифования

Установлено, что наиболее эффективной с точки зрения влияния кумулятивной струи является величина времени схлопывания  $\geq 10^{-8}$  с. Показано, что число наночастиц, попадающих в каналы МТ за счет действия кумулятивной струи, существенно зависит от времени схлопывания кавитационного пузырька и геометрических параметров МТ. Показано, что эффективный модуль Юнга в зависимости от величины времени схлопывания кавитационного пузырька может превышать свою начальную величину примерно на два порядка. Выявлено качественное соответствие теоретических результатов результатам эксперимента: в результате добавления в СОЖ наночастиц Ni при шлифовании образцов лопатки турбокомпрессора было достигнуто снижение шероховатости поверхности по параметру  $R_a$  на 10 % и повышение микротвердости поверхности более чем на 20 %.

Таким образом, использование кавитационных технологий для модифицирования дефектной структуры поверхности деталей машин в процессе финишной обработки сопровождается упрочнением поверхностного слоя металла и снижением его шероховатости.

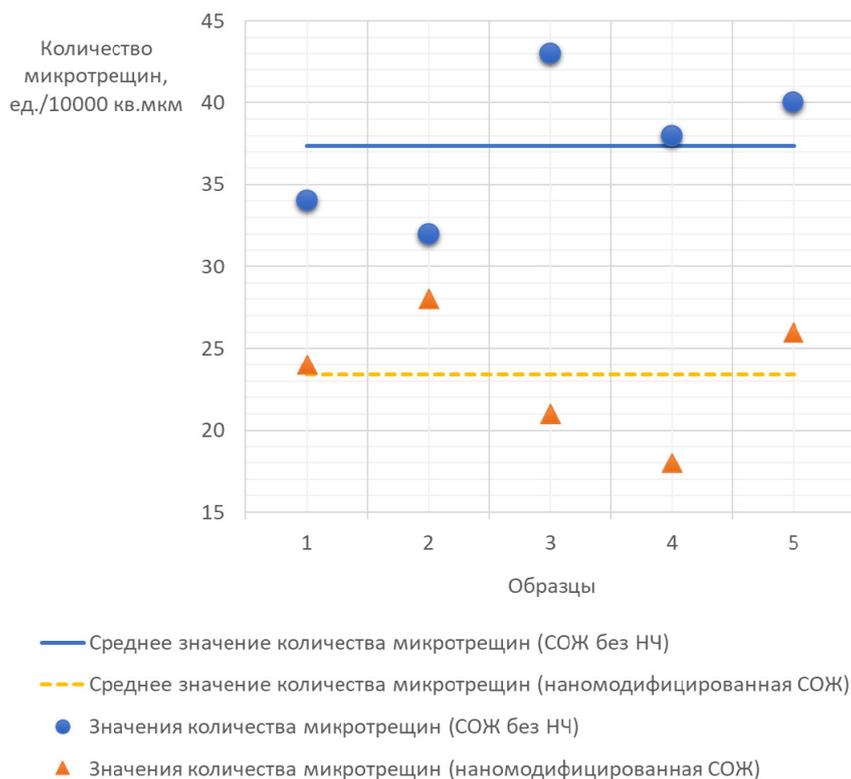


Рис. 5. Распределение значений количества микротрещин, приходящихся на 10 000 мкм<sup>2</sup> поверхности образцов после шлифования

*Автор выражает признательность Пензенскому государственному университету и лично Кревчику Владимиру Дмитриевичу, доктору физико-математических наук, профессору, декану факультета приборостроения, информационных технологий и электроники Пензенского государственного университета, а также Артемову Игорю Иосифовичу, доктору технических наук, профессору, директору научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований Пензенского государственного университета за оказанную помощь при проведении исследования.*

#### **Библиографический список**

1. **Тихоненко, В. В.** Упрочняющие технологии формирования износостойких поверхностных слоев / В. В. Тихоненко, А. М. Шкилько // Физическая инженерия поверхности. – 2011. – Т. 9, № 3. – С. 237–243.
2. Особенности алмазного шлифования изделий из твердого и хрупкого материалов с применением наночастиц в смазочно-охлаждающей жидкости / И. И. Артемов, В. Д. Кревчик, А. В. Соколов, Н. П. Симонов, Н. Е. Артемова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 145–159.
3. **Белоус, В. И.** Модифицирование смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании труднообрабатываемых материалов / В. И. Белоус // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7 (84). – С. 66-70.

4. **Дружинин, Г. А.** Нелинейная акустика / Г. А. Дружинин. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ, 2009. – 69 с.
5. **Андриевский, Р. А.** Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. Ч. 2. Механические и физические свойства / Р. А. Андриевский, А. М. Глезер // Физика металлов и металловедение. – 2000. – Т. 89, № 1. – С. 91–112.
6. Синтетические сверхтвердые материалы : в 3 т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов / отв. ред. Н. В. Новиков. – Киев : Наукова думка, 1986. – 280 с.

#### **References**

1. Tikhonenko V. V., Shkil'ko A. M. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti* [Surface physical engineering]. 2011, vol. 9, no. 3, pp. 237–243. [In Russian]
2. Artemov I. I., Krevchik V. D., Sokolov A. V., Simonov N. P., Artemova N. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 145–159. [In Russian]
3. Belous V. I. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aircraft and space technology]. 2011, no. 7 (84), pp. 66–70. [In Russian]
4. Druzhinin G. A. *Nelineynaya akustika* [Nonlinear acoustics]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2009, 69 p. [In Russian]
5. Andrievskiy R. A., Glezer A. M. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy]. 2000, vol. 89, no. 1, pp. 91–112. [In Russian]
6. *Sinteticheskie sverkhтвердые материалы: в 3 т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов* [Synthetic superhard materials: in 3 volumes. Vol. 1. Synthesis of superhard materials]. Execut. ed. N. V. Novikov. Kiev: Naukova dumka, 1986, 280 p.

---

**Симонов Николай Петрович**  
соискатель, Пензенский  
государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

**Simonov Nikolay Petrovich**  
Applicant, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

E-mail: artemov@pnzgu.ru

---

#### **Образец цитирования:**

Симонов, Н. П. Использование кавитационной технологии с наномодифицированной смазочно-охлаждающей жидкостью для повышения прочности поверхностного слоя в процессе финишной обработки конструкционных материалов / Н. П. Симонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 121–134. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-4-10.

### **Внимание 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) 36-84-87. 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.