

## ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

**Учредитель:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Подписной индекс в «Каталоге периодических изданий. Газеты и журналы» ГК «Урал Пресс» - 41891. Физические лица могут оформить подписку в интернет-магазине «Деловая пресса» <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал выходит шесть раз в год

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Главный редактор В.Р. Петренко**, д-р техн. наук – Воронеж  
**Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов**, д-р техн. наук – Воронеж  
**Ответственный секретарь Ю.В. Татаренко** – Воронеж

### ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

В.Н. Бурков – д-р техн. наук – Москва;  
Д.А. Новиков – д-р техн. наук – Москва;  
С. Лухан-Мора – проф. – Испания;  
А.К. Погодаев – д-р техн. наук – Липецк;  
А.Ф. Тузовский – д-р техн. наук – Москва;  
С.Л. Подвальный – д-р техн. наук – Воронеж;  
В.Л. Бурковский – д-р техн. наук – Воронеж;  
В.В. Куц – д-р техн. наук – Курск;  
А.Г. Ивахненко – д-р техн. наук – Курск;  
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;  
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;  
В.В. Пешков – д-р техн. наук – Воронеж;  
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;  
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;  
В.П. Пашинцев – д-р техн. наук – Ставрополь;  
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;  
Ю.С. Балашов – д-р физ.-мат. наук – Воронеж;  
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;  
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза  
А.А. Гладких – д-р техн. наук – Ульяновск;  
А.В. Башкиров – д-р техн. наук – Воронеж

Ответственность за подбор и изложение фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений несут авторы публикаций. Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке статей ссылка на журнал обязательна.

**Адрес редакции:** 394026, Воронеж, Московский проспект, дом 14, комн. 212

**Телефон:** +7 (473) 246-28-63

**E-mail:** [vestnik@vorstu.ru](mailto:vestnik@vorstu.ru)

**Издатель:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

**Адрес издателя:** 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2022

12+

## BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration certificate PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

**Founder:** Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Subscription index in the «Catalog of periodicals. Newspapers and magazines» of the «Ural Press» Group of Companies – 41891. Individuals can subscribe to it in the online store "Business Press" <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

The journal "Bulletin of Voronezh State Technical University" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published.

The journal is published six times a year

### EDITORIAL BOARD:

**Editor-in-Chief V.R. Petrenko**, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh  
**Deputy Editor-in-Chief I.G. Drozdov**, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh  
**Executive secretary Yu.V. Tatarenko** – Voronezh

### MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

V.N. Burkov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;  
D.A. Novikov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;  
Sergio Lujan Mora – Professor – Spain;  
A.K. Pogodaev – Dr. Sc. (Tech.) – Lipetsk;  
A.F. Tuzovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;  
S.L. Podvalny – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
V.L. Burkovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
V.V. Kuts – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;  
A.G. Ivakhnenko – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;  
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;  
V.V. Peshkov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
V.P. Pashintsev – Dr. Sc. (Tech.) – Stavropol;  
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
Yu.S. Balashov – Dr. Sc. (Phys. and Math.) – Voronezh;  
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza;  
A.A. Gladkikh – Dr. Sc. (Tech.) – Ulyanovsk;  
A.V. Bashkirov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

The authors of publications are responsible for the selection and presentation of facts, quotations, statistics and other information. The articles coming to the editorial office are reviewed. The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors of the materials. When reprinting articles, the link to the journal is obligatory.

**Address:** 394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 212

**Phone number:** +7(473)246-28-63

**E-mail:** [vestnik@vorstu.ru](mailto:vestnik@vorstu.ru)

**Publisher:** Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

**Publisher address:** 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© Voronezh State Technical University, 2022

12+

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика, вычислительная техника и управление

Вычислительные эксперименты с непрерывной формой метода максимальной согласованности в регрессионном анализе <b>С.И. Носков, Ю.А. Бычков.....</b>	<b>7</b>
Голосовой помощник для управления операционной системой <b>П.С. Скочко, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, С.Л. Кенин.....</b>	<b>13</b>
Создание информационной системы дистанционного обучения в ведомственном вузе <b>А.В. Хорошева.....</b>	<b>17</b>

### Радиотехника и связь

Перестраиваемая антенная система с SIW для сетей 5G <b>С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, К.А. Бердников, С.И. Деревянкин, Е.В. Папина, Н.Б. Смольянов.....</b>	<b>26</b>
Сравнительный анализ результатов лётных испытаний передачи высокоскоростной целевой информации с модуляцией QAM и OFDM <b>Д.Г. Пантенков, М.А. Загнетко, В.П. Литвиненко.....</b>	<b>31</b>
Качественная оценка распознавания радиоизлучений при проведении радиоконтроля линий спутниковой связи <b>Р.И. Буров, В.В. Капитанов.....</b>	<b>47</b>
Динамически управляемая Bi-Quad антенна на основе активного метаматериала <b>К.А. Бердников, Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров.....</b>	<b>56</b>
Методика оценки вероятностных характеристик обнаружения с кусочно-линейной аппроксимацией решающей функции <b>В.С. Костенников, М.Ф. Волобуев, В.Н. Надточий.....</b>	<b>61</b>
Разработка функциональных блоков для линейного стабилизатора напряжения <b>Д.О. Лялин, Е.Д. Алперин.....</b>	<b>66</b>
Зеркальная антенна на основе SIW технологии <b>И.А. Баранников, К.А. Бердников, С.И. Деревянкин, Е.А. Ищенко, К.В. Смусева, С.М. Фёдоров.....</b>	<b>72</b>
Автономный портативный электроэнцефалограф на базе одноплатного компьютера Nvidia Jetson <b>А.Б. Степанов, Д.В. Козлов, А.В. Запайщиков.....</b>	<b>77</b>
Датчики напряженности электрического поля сдвоенного типа повышенной точности <b>С.В. Бирюков, А.В. Тюкин, Л.В. Тюкина.....</b>	<b>86</b>

### Машиностроение и машиноведение

Особенности выявления дефектов типа «поры» в стальных сварных соединениях <b>М.Н. Давыдов, С.В. Сафонов, В.В. Шурупов.....</b>	<b>94</b>
---	-----------

Разработка и исследование устройства для штамповки деталей из труднодеформируемых сплавов

**А.Ю. Боташев, Р.А. Байрамуков, А.А. Айбазов..... 101**

Применение регрессионного анализа при решении задачи определения значимых параметров электрохимической обработки неподвижным электродом-инструментом

**А.И. Болдырев, А.В. Перова, А.А. Болдырев..... 108**

Отработка технологичности при создании конкурентоспособной авиационно-космической техники

**С.В. Сафонов, А.В. Мандрыкин, М.Н. Давыдов..... 114**

## CONTENTS

### Informatics, computer engineering and control

Computational experiments with the continuous form of the maximum consistency method in regression analysis <b>S.I. Noskov, Yu.A. Bychkov.....</b>	<b>7</b>
Voice assistant to control an operating system <b>P.S. Skochko, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, S.L. Kenin .....</b>	<b>13</b>
Creating an information system for distance learning at a departmental higher education institution <b>A.V. Khorosheva.....</b>	<b>17</b>

### Radio engineering and communication

Configurable antenna system with siw for 5G networks <b>S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, K.A. Berdnikov, S.I. Derevyankin, E.V. Papina, N.B. Smolyanov.....</b>	<b>26</b>
Comparative analysis of the results of flight tests of transmission of high-speed target information with QAM and OFDM modulation <b>D.G. Pantenkov, M.A. Zagnetko, V.P. Litvinenko.....</b>	<b>31</b>
Qualitative assessment of the recognition of radio emissions during radio monitoring of satellite communication lines <b>R.I. Burov, V.V. Kapitanov.....</b>	<b>47</b>
Dynamically controlled Bi-Quad antenna based on active metamaterial <b>K.A. Berdnikov, E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, S.M. Fyedorov.....</b>	<b>56</b>
Methodology for assessing the probabilistic characteristics of detection with piecewise linear approximation of the solving function <b>V.S. Kostennikov, M.F. Volobuev, V.N. Nadtochiy.....</b>	<b>61</b>
Development of functional blocks for linear voltage stabilizer <b>D.O. Lyalin, E.D. Alperin.....</b>	<b>66</b>
Reflector antenna based on SIW technology <b>I.A. Barannikov, K.A. Berdnikov, S.I. Derevyankin, E.A. Ishchenko, K.V. Smuseva, S.M. Fyedorov.....</b>	<b>72</b>
Autonomous portable electroencephalograph based on Nvidia Jetson single-board computer <b>A.B. Stepanov, D.V. Kozlov, A.V. Zapayshchikov.....</b>	<b>77</b>
Dual type of electric field sensors of increased accuracy <b>S.V. Biryukov, A.V. Tyukin, L.V. Tyukina.....</b>	<b>86</b>

### Mechanical engineering and science of machines

Detecting defects of the "pores" type in steel welded joints <b>M.N. Davydov, S.V. Safonov, V.V. Shurupov.....</b>	<b>94</b>
---	-----------

Development and research of a device for stamping parts from hard-to-deform alloys <b>A.Yu. Botashev, R.A. Bayramukov, A.A. Aybazov.....</b>	<b>101</b>
Application of regression analysis in solving the problem of determining significant parameters for electrochemical processing with a fixed electrode-tool <b>A.I. Boldyrev, A.V. Perova, A.A. Boldyrev.....</b>	<b>108</b>
Development of manufacturability in the creation of competitive aerospace technology <b>S.V. Safonov, A.V. Mandrykin, M.N. Davydov.....</b>	<b>114</b>

## **Информатика, вычислительная техника и управление**

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.2.001

УДК 519.852

### **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НЕПРЕРЫВНОЙ ФОРМОЙ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОЙ СОГЛАСОВАННОСТИ В РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ**

**С.И. Носков, Ю.А. Бычков**

**Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия**

**Аннотация:** рассмотрены особенности оценивания параметров линейной регрессионной модели с применением непрерывной формы метода максимальной согласованности (НММС) между расчетными и фактическими значениями зависимой переменной. При этом дискретная форма такой согласованности формально выражается суммой числа совпадений знаков приращений этих значений на всех парах номеров наблюдений выборки. Проведены вычислительные эксперименты с четырехфакторной и пятью трехфакторными вариантами модели протяженности магистральных газопроводов и газопроводов-отводов в однониточном исчислении. В качестве независимых переменных использованы: объем производства стабильного газового конденсата и нефти, разведанные и доказанные запасы природного газа, разведанные запасы газового конденсата. В ходе проведенных экспериментов изучались вопросы: выяснения влияния значений параметра компромисса между НММС-оценками параметров и оценками, полученными методом наименьших модулей, на критерии адекватности модели: суммы модулей ошибок и величин рассогласованности, среднюю ошибку аппроксимации; выявления диапазонов изменения точки нетривиальности в задаче линейного программирования, реализующей НММС; оценки адекватности вариантов модели. Весьма низкие значения перечисленных критериев адекватности всех вариантов моделей указывают на их высокое качество при описании исследуемого объекта

**Ключевые слова:** регрессионная модель, функция потерь, критерий согласованности поведения, метод максимальной согласованности, метод наименьших модулей, вычислительные эксперименты

#### **Введение**

Регрессионный анализ – гибкий и эффективный инструмент, позволяющий исследователю анализировать сложные объекты вне зависимости от их природы. Так, в работе [1] регрессионный анализ применяется для минимизации усилий, прикладываемых исследователями для решения задач с громоздкими и многомерными вычислениями. В ряде работ [2-4] раскрывается возможность применения регрессионного моделирования как способа прогнозирования динамики сложных процессов. В [3] показывается, как, обладая большими объемами информации о людях и их привычках, за счёт использования инструментария регрессионного анализа, маркетологи могут предсказывать поведенческие факторы и предугадывать, какие продукты и товары выберет среднестатистический покупатель в той или иной ситуации. В [5] рассматриваются взаимосвязи, позволяющие дать количественную оценку концептуальным моделям затрат на получение медицинских услуг, тем самым создавая основу для объяснения: почему одни люди несут чрезвычайно высокие расходы на здравоохранение, а

другим такие услуги почти ничего не стоят.

В рамках регрессионного анализа разработано значительное количество критериев адекватности моделей. Одним из наиболее часто используемых из них является критерий множественной детерминации. В [6] на его основе предлагается новый метод оценивания силы нелинейной статистической связи. В [7] критерий множественной детерминации задействован для определения наиболее важных признаков чистой прибыли организации и определения факторов, оказывающих существенное отрицательное влияние на моделируемый объект. Другими популярными критериями определения адекватности модели служат критерий Фишера, Стьюдента и Дарбина-Уотсона. В работе [8] для оценки адекватности построенных регрессионных моделей, используемых при составлении прогнозов производственных потребностей промышленных предприятий на примере потребления электрической энергии на территории Республики Северная Осетия – Алания, использованы именно эти критерии.

Все традиционные критерии оценки адекватности регрессионных моделей, в том числе упомянутые выше, на формальном уровне базируются на их ошибках аппроксимации. Настоящая работа основана на разработанном и

развитом С.И. Носковым критерии согласованности поведения (КСП) наблюдаемых и расчетных значений зависимой переменной (см., в частности, [9-12]) и его непрерывной версии НКСП [13, 14]. Использование КСП позволяет лучше оценить «объясняющие» качества модели. В работах [15, 14] описан базирующийся на КСП метод максимальной согласованности (ММС) в его дискретной и непрерывной формах.

### Непрерывная форма метода максимальной согласованности

Рассмотрим линейную регрессионную модель (уравнение)

$$y_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $y$  – зависимая, а  $x_i$  –  $i$ -я независимая переменные,  $\alpha_i$  –  $i$ -й подлежащий оцениванию параметр,  $\varepsilon_k$  – ошибки аппроксимации,  $k$  – номер наблюдения,  $n$  – их число (длина выборки).

Представим уравнение (1) в векторной форме:

$$y = X\alpha + \varepsilon, \quad (2)$$

где  $y = (y_1, \dots, y_n)^T$ ,  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)^T$ ,  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^T$ ,  $X$  –  $(n \times m)$  – матрица с компонентами  $x_{ki}$ .

Заметим, что уравнение (1) имеет детерминированный характер.

В случае, если оно содержит свободный член, первый столбец матрицы  $X$  будет состоять из единиц.

Модель (1) можно представить в виде:

$$y_k = \hat{y}_k + \varepsilon_k, k = \overline{1, n},$$

где  $y_k$  и  $\hat{y}_k$  – соответственно фактические и расчетные (вычисленные по модели) значения зависимой переменной  $y$ .

Рассмотрим следующую ситуацию [15]. Пусть после построения модели (1) для произвольных номеров наблюдений  $s$  и  $h$  обрабатываемой выборки окажется справедливым неравенство

$$(y_s - y_h)(\hat{y}_s - \hat{y}_h) < 0.$$

Это означает, что на паре номеров наблюдений  $(s, h)$  модель (1) плохо «объясняет» исследуемый процесс, что не может быть компенсировано малостью величин  $|\varepsilon_s|$  и  $|\varepsilon_h|$ . Ука-

занное обстоятельство особенно пагубно при исследовании с помощью методов моделирования динамических процессов. Подобные ситуации формализуются с помощью КСП, обобщенная форма представления которого (ОКСП) имеет вид [11]:

$$\Phi(\alpha) = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n \sigma_{ks}, \quad (3)$$

где

$$\sigma_{ks} = \begin{cases} 1, & (y_k - y_s)(\hat{y}_k - \hat{y}_s) \geq 0 \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Предложенный в работе [15] метод максимальной согласованности позволяет свести задачу максимизации функции  $\Phi(\alpha)$  к задаче линейно-булевого программирования, поскольку и КСП, и ОКСП имеют дискретный характер. В работе [14] предложена их непрерывная форма НКСП:

$$N(a) = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n l_{ks}, \quad (4)$$

где

$$l_{ks} = \begin{cases} |\hat{y}_k - \hat{y}_s|, & (y_k - y_s)(\hat{y}_k - \hat{y}_s) < 0 \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Очевидно, что, в отличие от КСП или ОКСП, значение НКСП тем лучше, чем оно меньше. При  $N(a)=0$  поведение расчетных и фактических значений зависимой переменной следует считать вполне согласованным. Минимизация функции  $N(a)$  представляет собой непрерывную форму ММС (НММС). Дадим ее краткое описание, следуя [14].

Введем в рассмотрение матрицу  $\Omega = ||\omega_{ks}||$ ,  $k = \overline{1, n-1}$ ,  $s = \overline{k+1, n}$  следующим образом

$$\omega_{ks} = \begin{cases} 1, & y_k - y_s > 0 \\ -1, & y_k - y_s < 0 \\ 0, & y_k - y_s = 0. \end{cases}$$

Введем также положительные  $\beta, u$  и отрицательные  $\gamma, v$  части векторов  $a$  и  $\varepsilon$  соответственно:

$$\beta_i = \begin{cases} \alpha_i, & \alpha_i > 0 \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$\gamma_i = \begin{cases} -\alpha_i, & \alpha_i < 0 \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$u_k = \begin{cases} \varepsilon_k, & \varepsilon_k > 0 \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$



$$v_k = \begin{cases} -\varepsilon_k, & \varepsilon_k < 0 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

так, что выполняются соотношения:

$$a = \beta - \gamma, \quad \beta_i \gamma_i = 0, \quad (5)$$

$$\varepsilon = u - v, \quad u_k v_k = 0. \quad (6)$$

Тогда задача минимизации НКСП (4) представима в виде следующей задачи линейного программирования (ЛП):

$$r \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) + (1-r) \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n l_{ks} + \delta \sum_{i=1}^m (\beta_i + \gamma_i) \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$X(\beta - \gamma) + u - v = y, \quad (8)$$

$$\omega_{ks} \sum_{i=1}^m (\beta_i - \gamma_i) (x_{ki} - x_{si}) + l_{ks} \geq 0, \quad k=\overline{1, n-1}, \quad s=\overline{k+1, n}, \quad (9)$$

$$u \geq 0, \quad v \geq 0, \quad \beta \geq 0, \quad \gamma \geq 0, \quad l_{ks} \geq 0. \quad (10)$$

Здесь  $r \in (0,1]$  – заранее выбранное число, гарантирующая справедливость равенств  $u_k v_k = 0, k=\overline{1, n}$  и выполняющая также функцию недопустимости получения тривиального решения задачи,  $\delta$  – малая положительная константа. При этом третье слагаемое в (7) гарантирует выполнение соотношений (5). Легко видеть, что при  $r = 1$  задача ЛП (7) – (10) реализует метод наименьших модулей (МНМ), а при значении  $r$ , близком к 0, она позволяет определить оценки параметров модели (2), обеспечивающие максимальную согласованность поведения расчетных и фактических значений выходной переменной в смысле представления (4).

Параметр  $r$  будем считать в дальнейшем мерой компромисса между НММС- и МНМ-оценками.

### Численные эксперименты с НММС по отношению к регрессионным моделям протяженности газопроводных сетей

Займемся теперь выяснением того, как влияют различные значения  $r$  в целевой функции (7) на оценки параметров регрессионной модели (1) и на значения величин  $M, L, E$ , где  $M = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k|$  – показатель точности модели в соответствии с МНМ,  $L = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n l_{ks}$  – показатель точности модели в соответствии с НММС,  $E = 100\% \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k / y_k|$  – средняя относительная ошибка аппроксимации.

Важен также вопрос, какое значение для каждой модели примет величина  $r^*$ , которую будем называть точкой нетривиальности задачи

(7) – (10), то есть такую, что для всех  $r \in (0, r^*)$  при наличии в модели (1) свободного члена  $a_0$  он становится равным среднему на выборке значению зависимой переменной и, кроме того, оказываются справедливыми равенства  $L = \alpha_i = 0, i=\overline{1, m}$ . Если же свободный член в уравнение (1) не входит, для тривиальных решений задачи будут справедливы только последние равенства нулю.

Для проведения численных экспериментов используем данные по газификации России по группе компаний «Газпром» за 2005 – 2020 годы [16].

Будем строить одну четырехфакторную

$$y_t = \alpha_0 + x_{t-2,1} + \alpha_2 x_{t-2,2} + \alpha_3 x_{t-2,3} + \alpha_4 x_{t-2,4} + \varepsilon_t, \quad t = \overline{2007, 2020} \quad (11)$$

и четыре трехфакторных моделей

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 x_{t-2,2} + \alpha_2 x_{t-2,3} + \alpha_3 x_{t-2,4} + \varepsilon_t, \quad t = \overline{2007, 2020}, \quad (12)$$

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 x_{t-2,1} + \alpha_2 x_{t-2,3} + \alpha_3 x_{t-2,4} + \varepsilon_t, \quad t = \overline{2007, 2020}, \quad (13)$$

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 x_{t-2,1} + \alpha_2 x_{t-2,2} + \alpha_3 x_{t-2,4} + \varepsilon_t, \quad t = \overline{2007, 2020}, \quad (14)$$

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 x_{t-2,1} + \alpha_2 x_{t-2,2} + \alpha_3 x_{t-2,3} + \varepsilon_t, \quad t = \overline{2007, 2020}. \quad (15)$$

Здесь:

$y_t$  – протяженность магистральных газопроводов и газопроводов-отводов в одноконтурном исчислении, тыс. км;

$x_1$  – объем производства стабильного газового конденсата и нефти, тыс. т.;

$x_2$  – разведанные запасы природного газа, млрд. м<sup>3</sup>;

$x_3$  – доказанные запасы природного газа, млрд. м<sup>3</sup>;

$x_4$  – разведанные запасы газового конденсата, млн. т.

Исходя из естественных содержательных соображений модели (11) – (15) содержат независимые переменные с двухлетним временным лагом, поскольку большие его значения не позволяют установить длину выборки данных.

Численные эксперименты с НММС по отношению к регрессионным моделям (11) – (15) будем проводить следующим образом. Вначале с помощью специально разработанной программы посредством перебора узлов равномер-



ной сетки, заданной на полуинтервале  $(0, 1]$  и с использованием метода деления отрезка пополам найдем значения  $r^*$  для каждой модели с точностью до четвертого знака после запятой. Соответствующую  $r^*$  оценку вектора параметров  $\alpha$  и следует считать НММС-оценкой. Затем определим число  $r^\wedge$ , представляющее собой округление  $r^*$  в большую сторону до ближайшего десятичного разряда. После этого постро-

им модели (11) – (15) со значениями  $r$ , равными узлам равномерной сетки на отрезке  $[r^\wedge, 1]$  с шагом 0.1.

Результаты расчетов приведены в таблице. При этом в ней размещены только не повторяющиеся вектора параметров моделей  $\alpha$  и соответствующие им значения  $M, L, E$ .

Результаты численных экспериментов с моделями (11) – (15)

$r$	$\alpha$	$L$	$M$	$E$
Модель (11)				
0.0143	(156.47, 0.00061, 0.000054, 0.000015, 0.0058)	0.35	44.26	1.94
0.1	(101.21, 0.0010, 0.00032, 0.0013, 0.019)	1.10	18.06	0.76
0.2	(98.79, 0.00071, 0.00064, 0.00086, 0.020)	1.35	16.11	0.68
0.7	(99.79, 0.00084, 0.00072, 0.00083, 0.017)	1.55	15.99	0.67
Модель (12)				
0.0252	(129.94, 0.00041, 0.00048, 0.012)	0.8	37.88	1.65
0.1	(91.55, 0.00078, 0.00080, 0.026)	1.62	17.77	0.75
0.2	(91.55, 0.00075, 0.00059, 0.029)	1.77	17.02	0.72
0.6	(90.32, 0.00062, 0.00085, 0.030)	1.87	16.95	0.72
0.8	(91.47, 0.00044, 0.00091, 0.032)	2.03	16.90	0.72
0.9	(93.03, 0.00019, 0.00099, 0.036)	2.41	16.84	0.71
Модель (13)				
0.0145	(156.88, 0.0006, 0.000032, 0.0066)	0.36	44.49	1.95
0.1	(96.80, 0.00075, 0.0018, 0.025)	1.12	19.02	0.81
0.3	(95.49, 0.00053, 0.0016, 0.028)	1.28	18.63	0.79
0.5	(82.70, 0.00065, 0.0022, 0.029)	1.29	18.62	0.79
0.6	(91.73, 0.00020, 0.0011, 0.040)	2.24	17.84	0.75
0.7	(91.18, -0.000041, 0.0011, 0.041)	2.97	17.51	0.74
0.8	(90.58, -0.00030, 0.0011, 0.048)	3.89	17.28	0.73
1	(90.64, -0.00028, 0.0011, 0.043)	3.79	17.19	0.73
Модель (14)				
0.0147	(156.11, 0.00061, 0.00010, 0.0051)	0.37	44.08	1.93
0.1	(112.0069, 0.00075, 0.00089, 0.016)	1.37	18.73	0.80
0.2	(103.86, 0.00061, 0.0010, 0.019)	1.55	17.56	0.74
0.4	(101.63, 0.00040, 0.0010, 0.022)	1.66	17.34	0.74
Модель (15)				
0.0276	(161.41, 0.00090, 0.00010, -0.00000016)	0.67	44.99	1.97
0.1	(135.40, 0.0017, 0.00080, -0.00018)	1.99	25.48	1.10
0.2	(125.42, 0.0017, 0.0011, -0.00028)	2.73	21.67	0.92
0.3	(114.86, 0.0018, 0.0011, 0.00037)	3.46	19.55	0.83
0.4	(110.00, 0.0018, 0.0010, 0.00075)	3.95	18.75	0.79
0.5	(107.69, 0.0015, 0.0012, 0.00069)	4.65	18.05	0.76

Анализ содержащейся в таблице информации позволяет сделать следующие выводы:

1. Значения  $r^*$  весьма малы и расположены в диапазоне от 0.0143 до 0.0276.
2. На отрезке  $[r^\wedge, 1]$  расположено от 4 до 8 значений  $r$ , которым соответствуют различные вектора параметров  $\alpha$ .

3. Оценки параметров модели (13) со значениями  $r$ , равными 0.7, 0.8, 1 и модели (15) со значениями  $r$ , равными  $r^*$ , 0.1, 0.2 следует считать неприемлемыми из-за отрицательности некоторых компонент, что не согласуется со смыслом независимых переменных.

4. Соответствующая  $r = r^*$  НММС-оценка параметров характеризуется максимальным для всех моделей значением свободного члена  $\alpha_0$ , что вполне согласуется с характером критерия (4).

5. Вектора оценок параметров, соответствующие значениям  $r \in [r^*, 1)$  в таблице, следует считать компромиссными между НММС- и МНМ-оценками.

6. Низкие значения критерия Е для всех вариантов моделей указывают на их адекватность исследуемому объекту.

### Заключение

В работе рассмотрены особенности вычисления оценок параметров линейной регрессионной модели с использованием непрерывной формы метода максимальной согласованности между расчетными и фактическими значениями зависимой переменной.

Получены следующие результаты.

1. С использованием НММС построено пять вариантов модели протяженности магистральных газопроводов и газопроводов-отводов в однокритериальном исчислении с различными значениями параметра  $r$ .

2. Дан краткий анализ результатов вычислительных экспериментов с каждым из этих вариантов.

### Литература

1. Putcha C., Dutta S., Gupta S.K. Reliability and Risk Analysis in Engineering and Medicine. Springer. Cham, 2021.
2. Guerard J.B., Saxena A., Gultekin M. Quantitative Corporate Finance. Springer. Cham, 2021.
3. Research Methods and Data Analysis for Business Decisions / Sallis J.E., Gripsrud G., Olsson U.H., Silkoset R. Springer. Cham, 2021.

4. Multivariate Analysis / Backhaus K., Erichson B., Gensler S., Weiber R., Weiber T. Springer Gabler, Wiesbaden, 2021.

5. Etzioni R., Mandel M., Gulati R. Statistics for Health Data Science. Springer. Cham, 2020.

6. Бахрушин В.Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей // Системные технологии. 2011. № 2(73). С. 9-14.

7. Фадеева Е.П., Титов А.Н., Тазиева Р.Ф. Построение модели множественной регрессии прибыли и декомпозиция риска её получения на коммерческую, производственную и финансовую составляющие // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 5. С. 165-173.

8. Лапинский Г.С., Майрансаев З.Р. Однофакторные регрессионные модели прогнозирования электропотребления промышленных предприятий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 5(142). С. 241-246.

9. Носков С.И. Построение эконометрических зависимостей с учетом критерия «согласованность поведения» // Кибернетика и системный анализ. 1994. №1. С. 177-180.

10. Носков С.И. Критерий «согласованность поведения» в регрессионном анализе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. №1. С. 107-111.

11. Носков С.И. Обобщенный критерий согласованности поведения в регрессионном анализе // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2018. № 1 (1). С. 14-20.

12. Базилевский М.П., Носков С.И. Программный комплекс построения линейной регрессионной модели с учетом критерия согласованности поведения фактической и расчетной траекторий изменения значений объясняемой переменной // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 9 (128). С. 37-44.

13. Носков С.И. Технологии моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. Иркутск, 1996. 320 с.

14. Носков С.И. Применение непрерывного критерия согласованности поведения при построении регрессионных моделей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 6. С. 74-78.

15. Носков С.И. Метод максимальной согласованности в регрессионном анализе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 380-385.

16. Отчетность ПАО «Газпром» за 2021 год URL: <https://www.gazprom.ru/investors/disclosure/reports/2021> (дата обращения 23.01.2022)

Поступила 01.02.2022; принята 18.04.2022

### Информация об авторах

**Носков Сергей Иванович** – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), e-mail: [sergey.noskov.57@mail.ru](mailto:sergey.noskov.57@mail.ru), тел. +7 (914) 902-24-94, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

**Бычков Юрий Александрович** – аспирант кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), e-mail: [bychkov\\_ya@internet.ru](mailto:bychkov_ya@internet.ru), тел. +7 (924) 708-66-34, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7243-8445>

## COMPUTATIONAL EXPERIMENTS WITH THE CONTINUOUS FORM OF THE MAXIMUM CONSISTENCY METHOD IN REGRESSION ANALYSIS

S.I. Noskov, Yu.A. Bychkov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** we considered the features of estimating the parameters of a linear regression model using the continuous form of the maximum consistency method (CMCM) between the calculated and actual values of the dependent variable. At the same time, the discrete form of such consistency is formally expressed by the sum of the number of coincidences of the signs of increments of these values on all pairs of sample observation numbers. We carried out computational experiments with four-factor and five three-factor versions of the model for the length of main gas pipelines and gas pipeline branches in a single-line calculation. The independent variables used were the volume of production of stable gas condensate and oil, explored and proven reserves of natural gas, explored reserves of gas condensate. As a result of the experiments, we studied the following questions: elucidating the influence of the values of the compromise parameter between the CMCM -estimates of the parameters and the estimates obtained by the method of least modules; identifying the ranges of change of the nontriviality point in a linear programming problem that implements CMCM; assessing the adequacy of model options

**Key words:** regression model, loss function, behavior consistency criterion, maximum consistency method, least modulus method, computational experiments

### References

1. Putcha C., Dutta S., Gupta S.K. "Reliability and risk analysis in engineering and medicine", Springer, Cham, 2021.
2. Guerard J.B., Saxena A., Gultekin M. "Quantitative corporate finance", Springer, Cham, 2021.
3. Sallis J.E., Gripsrud G., Olsson U.H., Silkoset R. "Research methods and data analysis for business decisions", Springer, Cham, 2021.
4. Backhaus K., Erichson B., Gensler S., Weiber R., Weiber T. "Multivariate analysis", Springer Gabler, Wiesbaden, 2021
5. Etzioni R., Mandel M., Gulati R. "Statistics for health data science", Springer, Cham, 2020
6. Bakhrushin V.E. "Methods for estimating the characteristics of nonlinear statistical relationships", *System Technologies (Sistemnye tekhnologii)*, 2011, no. 2 (73), pp. 9-14.
7. Fadeeva E.P., Titov A.N., Tazieva R.F. "Building a model of multiple regression of profit and decomposing the risk of its receipt into commercial, industrial and financial components", *Bulletin of Technological University (Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 21, no. 5, pp. 165-173.
8. Lapinsky G.S., Mayransaev Z.R. "One-factor regression models for forecasting the power consumption of industrial enterprises", *Izvestiya SFedU. Technical science (Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki)*, 2013, no. 5 (142), pp. 241-246.
9. Noskov S.I. "Construction of econometric dependencies taking into account the criterion of "consistency of behavior"", *Cybernetics and System Analysis (Kibernetika i sistemnyy analiz)*, 1994, no. 1, pp. 177-180.
10. Noskov S.I. "The criterion of "consistency of behavior" in regression analysis", *Modern Technologies. System Analysis. Modeling (Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie)*, 2013, no. 1, pp. 107-111.
11. Noskov S.I. "Generalized criterion for consistency of behavior in regression analysis", *Information Technologies and Mathematical Modeling in the Management of Complex Systems (Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami)*, 2018, no. 1 (1), pp. 14-20.
12. Bazilevsky M.P., Noskov S.I. "Software complex for constructing a linear regression model taking into account the criterion for the consistency of the behavior of the actual and calculated trajectories of changing the values of the explained variable", *Bulletin of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 21, no. 9 (128), pp. 37-44.
13. Noskov S.I. "Technology of modeling objects with unstable functioning and uncertainty in data" ("Tekhnologiya modelirovaniya ob"ektov s nestabil'nyim funktsionirovaniem i neopredelennost'yu v dannykh"), Irkutsk, 1996, 320 p.
14. Noskov S.I. "Application of a continuous criterion for the consistency of behavior in the construction of regression models", *Izvestiya TulGU. Technical sciences (Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki)*, 2021, no. 6, pp. 74-78.
15. Noskov S.I. "The method of maximum consistency in regression analysis", *Bulletin of Tula State University. Technical science (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*, 2021, no. 1, pp. 380-385.
16. Reports of PJSC "Gazprom" for 2021, available at: <https://www.gazprom.ru/investors/disclosure/reports/2021> (date of access 23.01.2022)

Submitted 01.02.2022; revised 18.04.2022

### Information about the authors

**Sergey I. Noskov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Irkutsk State University of Communications (15 Chernyshevsky str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: [sergey.noskov.57@mail.ru](mailto:sergey.noskov.57@mail.ru), tel.: +7 (914) 902-24-94, <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

**Yuriy A. Bychkov**, graduate student, Irkutsk State University of Communications (15 Chernyshevsky str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: [bychkov\\_ya@internet.ru](mailto:bychkov_ya@internet.ru), tel.: +7 (924) 708-66-34, <https://orcid.org/0000-0002-7243-8445>

## ГОЛОСОВОЙ ПОМОЩНИК ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ

П.С. Скочко<sup>1</sup>, В.Ф. Барабанов<sup>1</sup>, Н.И. Гребенникова<sup>1</sup>, С.Л. Кенин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>ООО «Атос Айти Солюшенс Энд Сервисес», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрен широкий спектр применения голосового помощника. В последнее время большое распространение получили интеллектуальные системы, построенные на основе алгоритма распознавания речи, что обусловлено их функциональностью, простотой и удобством применения, а также широким диапазоном сфер, где возможно их применение. Востребованность таких систем привела к тому, что специалисты по речевым технологиям, проводя исследования, стараются создать концептуально новые алгоритмы для расширения функциональных возможностей. В статье представлены алгоритм работы и модульная структура программного комплекса голосового помощника. Определены средства программной реализации голосового помощника (язык программирования Python, для считывания звука с микрофона использована библиотека pyAudio, для расшифровки речи использована библиотека SpeechRecognition, для расшифровки текста использован механизм нечеткого сравнения строк Fuzzywuzzy, для генерации речи использована технология text-to-speech библиотеки PyTTSx3). Для сравнения строк в работе применен распространенный алгоритм - расстояние Левенштейна. Основная идея алгоритма заключается в подсчете модуля разности двух последовательностей символов. С использованием выбранных средств реализации разработан голосовой помощник для пользователя операционной системой Windows с первичным набором демонстрационных функций

**Ключевые слова:** голосовой помощник, распознавание речи, распознавание команды, выполнение команды, генерация речи, расстояние Левенштейна, операционная система Windows, искусственный интеллект

### Введение

Одно из набирающих популярность направлений применения технологий, связанных с искусственным интеллектом, - голосовой помощник. Все это возможно благодаря широкому спектру применения данной технологии: от голосовых телефонных роботов до систем «умного дома».

Ниже приведен перечень основных направлений развития голосовых помощников:

- “очеловечивание” роботов: необходимо учесть акценты, сленг, слова-паразиты, идиомы и прочие вещи, делающие нашу речь “живой”;
- распознавание речи. Задача по улучшению средств распознавания речи все так же актуальна;
- кастомизация помощника. Создание голосовых профилей (новые имена, голоса, уникальные ответы);
- внедрение в новые сферы и девайсы. В данный момент около 90% всех помощников используются на смартфонах, порядка 9% - на компьютерах. Также ведутся работы по внедрению голосовых помощников в автомобили, «умные дома», бытовую технику и так далее;

– новое применение. На данном этапе развития основные сферы применения голосовых помощников - управление фонотеккой (Алиса), поиск информации в интернете (GoogleVoiceAssistant), онлайн-шоппинг (Alexa).

Как видно, направлений для дальнейших исследований достаточно много, что доказывает актуальность данной темы. В данной работе представлен голосовой помощник пользователя операционной системы.

### Модульная структура программного комплекса голосового помощника

Классическая схема алгоритма работы голосового помощника устроена следующим образом (рис. 1): все начинается с того, что в программу загружается звуковая дорожка. Она может быть получена с микрофона используемого устройства или же загружена в виде звукового файла. Также очень важно очистить входящий звуковой поток от шума. Преобразование звука в текст происходит с помощью системы распознавания речи. Формирование ответа чаще всего строится на шаблонах поведения. Все реплики голосового помощника определяются заранее и в зависимости от сказанного пользователем, система выбирает тот или

иной готовый ответ. И последний шаг - произношение ответа. Так как в данной работе будет выполнен голосовой помощник для управления операционной системой, необходимо было добавить шаг с выполнением команды, пришедшей от пользователя:

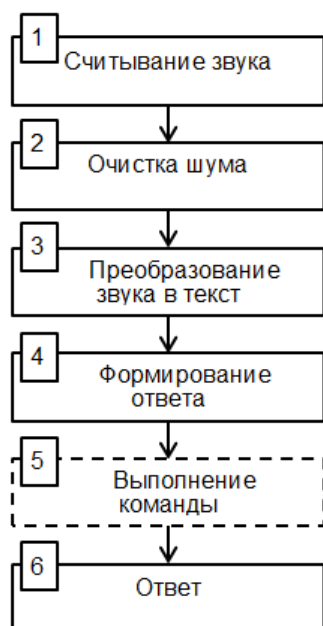


Рис. 1. Схема работы голосового помощника

Исходя из представленной выше схемы работы, можно выделить 4 основных модуля реализуемого программного обеспечения:

- модуль «Распознавание речи»;
- модуль «Распознавание команды»;
- модуль «Выполнение команды»;
- модуль «Генерация речи».

#### Средства реализации программного комплекса голосового помощника

После определения схемы работы необходимо выбрать средства реализации. В качестве используемого языка программирования было решено использовать Python.

Первой задачей является считывание и распознавание звукового сигнала. Для считывания звука с микрофона использована библиотека pyAudio.

Библиотеке SpeechRecognition было отдано предпочтение в задаче расшифровки речи. Существуют и другие библиотеки, такие как assemblyai или ariai, но SpeechRecognition выделяется на их фоне простотой использования.

Стоит также учитывать, что считывание и расшифровка текста не всегда будут проходить

идеально точно, что может стать проблемой для идентификации команды пользователя. Решением станет использование механизма нечеткого сравнения строк. Fuzzywuzzy - самый популярный на данный момент пакет, реализующий данный функционал. Данный пакет использует такой довольно распространенный алгоритм - Расстояние Левенштейна. Основная идея алгоритма заключается в подсчете модуля разности двух последовательностей символов. Разность определяется как минимальное количество посимвольных операций (удаление, замена и вставка), необходимых для превращения одной последовательности в другую.

Если к списку разрешённых операций добавить транспозицию (два соседних символа меняются местами), получается расстояние Дameraу — Левенштейна [6].

Пусть  $S_1$  и  $S_2$  - две строки длиной  $M$  и  $N$  соответственно, тогда расстояние Левенштейна  $d(S_1, S_2)$  можно подсчитать по следующей формуле  $d(S_1, S_2) = D(M, N)$ , при этом:

$$\begin{cases} 0, & i = 0, j = 0 \\ i, & j = 0, i > 0 \\ j, & i = 0, j > 0 \\ \min\{ \\ D(i, j - 1) + 1 \\ D(i - 1, j) + 1 \\ D(i - 1, j - 1) + m(S_1, S_2) \} \end{cases}, \quad j > 0, i > 0 \quad (1)$$

где  $m(a, b)$  равна 1 во всех случаях кроме  $a = b$ ;  $\min\{a, b, c\}$  возвращает наименьший аргумент. Здесь шаг  $i$  - это удаление (D) из первой строки,  $j$  - вставка (I) в первую строку, а шаг по обоим индексам символизирует замену символа (R) или отсутствие изменений (M).

Очевидно, справедливы следующие утверждения:

$$d(S_1, S_2) \geq |S_1| - |S_2| \quad (2)$$

$$d(S_1, S_2) \leq \max(|S_1|, |S_2|) \quad (3)$$

$$d(S_1, S_2) = 0 \leftrightarrow S_1 = S_2 \quad (4)$$

Для задачи генерации речи использована технология text-to-speech. Одним из возможных решений является библиотека PyTTSx3. Основное ее преимущество в том, что она кроссплатформенная и использует различные системы синтеза речи в зависимости от текущей операционной системы:

- SAPI5 для Windows;
- nsss для Mac OS;
- eSpeak для Linux.



### Сценарий работы голосового помощника

Реализовав схему работы голосового помощника, встает вопрос его функционального наполнения. В качестве демонстрационных примеров было решено реализовать функции воспроизведения текущего времени и погоды.

Реализуемый голосовой помощник будет прослушивать и анализировать поступающий с

микрофона звук в фоновом режиме. Для его активации необходимо произнести кодовое слово и после этого команду. В нашем случае кодовое слово – «Сергея». Библиотека команд представляет собой список структур типа ключ – значение. В качестве ключа будет выступать команда, а в качестве значения – список возможных ее активаций. Пример такой структуры данных представлен ниже:

```
commands = {
    "name": ('сергея', 'сергей'),
    "command": {
        "current_time": ('текущее время', 'сейчас времени', 'который час', 'времени', 'сколько времени'),
        "current_weather": ('какая погода', 'какая сейчас погода', 'что по погоде')
    }
}
```

Рис. 2. Структура данных библиотеки команд

Таким образом, распознанная речь очищается от имени помощника и последовательно сравнивается со всеми строками, активирующими команду. В случае, если не было обнаружено ни одного совпадения, помощник попросит повторить или перефразировать команду. В

противном случае найденная команда передается в модуль выполнения команды, в котором выполнена реализация команды и формирование ответа. Последний шаг – генерация речи. Описанный выше сценарий работы представлен ниже:



Рис. 3. Сценарий работы голосового помощника

### Заключение

В данной работе рассмотрена схема работы типичного голосового помощника, на основе которой был спроектирован алгоритм работы голосового помощника для пользователя операционной системой Windows. Были проанализированы и выбраны средства реализации каждого из модулей, на базе которых разработан голосовой помощник с первичным набором демонстрационных функций.

### Литература

1. Левенштейн В.И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов. Доклады Академии Наук СССР, 1965.
2. Pytsx3 2.90. URL: <https://pypi.org/project/pytsx3/>
3. PyAudio 0.2.11. URL: <https://pypi.org/project/PyAudio/>
4. SpeechRecognition 3.8.1. URL: <https://pypi.org/project/SpeechRecognition/>
5. fuzzywuzzy 0.18.0. URL: <https://pypi.org/project/fuzzywuzzy/>
6. Расстояние Левенштейна. URL:

[https://ru.wikipedia.org/wiki/Расстояние\\_Левенштейна](https://ru.wikipedia.org/wiki/Расстояние_Левенштейна)

7. Расстояние Левенштейна для поиска отпечатков в данных клиента. URL: <https://vc.ru/newtechaudit/129654-rasstoyanie-levenshteyna-dlya-poiska-opechatok-v-dannyh-klienta>

Поступила 20.01.2022; принята к публикации 18.04.2022

### Информация об авторах

**Скочко Павел Сергеевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [sko4ko.pavel@gmail.com](mailto:sko4ko.pavel@gmail.com)

**Барabanов Владимир Федорович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [bvf@list.ru](mailto:bvf@list.ru)

**Гребенникова Наталия Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [g-naty@yandex.ru](mailto:g-naty@yandex.ru)

**Кенин Сергей Леонидович** – канд. техн. наук, руководитель проектов, филиал в г. Воронеж ООО "Атос Айти Солюшенс Энд Сервисес" (394000, Россия, г. Воронеж, пр. Труда, 65), e-mail: [sergey.kenin@atos.net](mailto:sergey.kenin@atos.net)

## VOICE ASSISTANT TO CONTROL AN OPERATING SYSTEM

P.S. Skochko<sup>1</sup>, V.F. Barabanov<sup>1</sup>, N.I. Grebennikova<sup>1</sup>, S.L. Kenin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>ATOS, Voronezh, Russia

**Abstract:** we considered a wide range of applications of the voice assistant. Recently, intelligent systems based on a speech recognition algorithm have become widespread, due to their functionality, simplicity and ease of use, as well as a wide range of areas where they can be used. The demand for such systems has led to the fact that speech technology specialists, conducting research, are trying to create conceptually new algorithms to expand functionality. Here we present the algorithm of the work and the modular structure of the software package of a voice assistant. The means of software implementation of the voice assistant are defined (Python programming language, the PyAudio library is used to read sound from the microphone, the SpeechRecognition library is used to decrypt speech, the Fuzzywuzzy fuzzy string comparison mechanism is used to encrypt text, the text-to-speech technology of the PyTTSx3 library is used to generate speech). To compare the lines in the work, a common algorithm is used - the Levenshtein distance. The main idea of the algorithm is to calculate the modulus of the difference between two sequences of characters. Using the selected implementation tools, a voice assistant has been developed for the user of the Windows operating system with a primary set of demonstration functions

**Key words:** voice assistant, speech recognition, command recognition, command execution, speech generation, Levenshtein distance, Windows operating system, artificial intelligence

### References

1. Levenstein V.I. "Binary codes with correction of dropouts, inserts and substitutions of characters", *Reports of the USSR Academis of Sciences (Doklady Akademiy Nauk SSSR)*, 1965
2. Pyttsx3 2.90, available at: <https://pypi.org/project/pyttsx3/>
3. PyAudio 0.2.11, available at: <https://pypi.org/project/PyAudio/>
4. Speech Recognition 3.8.1, available at: <https://pypi.org/project/SpeechRecognition/>
5. fuzzy fuzzy 0.18.0, available at: <https://pypi.org/project/fuzzywuzzy/>
6. Levenshtein distance, available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Levenshtein\\_Distance](https://ru.wikipedia.org/wiki/Levenshtein_Distance)
7. Levenshtein distance to search for fingerprints in customer data, available at: <https://vc.ru/newtechaudit/129654-rasstoyanie-levenshteyna-dlya-poiska-opechatok-v-dannyh-klienta>

Submitted 20.01.2022; revised 18.04.2022

### Information about the authors

**Pavel S. Skochko**, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [sko4ko.pavel@gmail.com](mailto:sko4ko.pavel@gmail.com)

**Vladimir F. Barabanov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [bvf@list.ru](mailto:bvf@list.ru)

**Nataliya I. Grebennikova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [g-naty@yandex.ru](mailto:g-naty@yandex.ru)

**Sergey L. Kenin**, Cand. Sc. (Technical), ATOS (Voronezh) (65, prospekt Truda, Voronezh 394000, Russia), e-mail: [sergey.kenin@atos.net](mailto:sergey.kenin@atos.net)



## СОЗДАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ В ВЕДОМСТВЕННОМ ВУЗЕ

А.В. Хорошева

Владимирский юридический институт ФСИН России, г. Владимир, Россия

**Аннотация:** рассматривается процесс разработки системы дистанционного обучения для эффективной организации образовательного процесса ведомственного вуза на основе платформы дистанционного обучения Moodle. В ходе решения поставленной задачи разработана информационная структура электронных курсов Владимирского юридического института ФСИН России, созданы новые системные пользовательские роли, которые позволяют сделать работу в системе более безопасной и удобной, в том числе с точки зрения контроля образовательного процесса в целом и активности каждого пользователя. Для преподавателей предложена типовая структура электронного курса, позволяющая удобно размещать методические материалы по преподаваемым дисциплинам, получать обратную связь от обучающихся, проводить различные виды контроля формирования у обучающихся компетенций в соответствии с рабочими программами дисциплин. Такая структура позволяет отражать результаты текущего контроля успеваемости обучающихся в журнале учета учебных занятий, что является отличительным чертой организации обучения в ведомственном вузе. Для обучающихся был предложен авторский алгоритм прохождения электронного курса, который может быть реализован как при дистанционном или смешанном формате обучения, так и при обучении в очном формате. На примере информационного сопровождения дистанционного обучения для дисциплины «Информационные технологии в юридической деятельности» описан процесс формирования базы данных тестовых заданий. Экспериментальное тестирование, проведенное автором среди обучающихся по итогам изучения дисциплины «Информационные технологии в юридической деятельности», показало эффективность выбранного подхода к организации электронных курсов в электронной информационно-образовательной среде ведомственного вуза

**Ключевые слова:** система электронного обучения, дистанционное обучение, электронный курс, алгоритм прохождения курса, создание и распределение ролей в системе

### Введение

В настоящее время дистанционные технологии в системе высшего образования занимают важное место. Начиная с весны 2020, все вузы страны вынуждены периодически переходить с традиционного формата обучения на дистанционный или смешанный формат, причем переходы, как правило, происходят достаточно быстро. Поэтому для каждого вуза очень важно использовать надежную и удобную систему дистанционного обучения, позволяющую организовать образовательный процесс в соответствии со спецификой вуза, и поддерживать ее в актуальном состоянии.

Во владимирском юридическом институте ФСИН России успешно функционирует система дистанционного обучения, которая используется постоянно, вне зависимости от формата обучения и учитывает все особенности образовательного процесса в ведомственном вузе.

### Постановка задачи

Перед рабочей группой сотрудников вуза была поставлена задача: за короткое время и

без привлечения какого-либо дополнительного финансирования организовать качественное дистанционное обучение для всех категорий обучающихся: курсантов и студентов очного обучения, слушателей заочного обучения и факультета профессионального обучения и дополнительного профессионального образования. Необходимо было организовать проведение учебных занятий, оценивание результатов обучения, синхронное и асинхронное взаимодействие участников образовательного процесса.

При этом проведение занятий должно было проходить в режиме онлайн в соответствии с расписанием занятий, необходимо было также организовать самостоятельную работу обучающихся, текущий контроль знаний, проведение промежуточной аттестации по дисциплинам и ряд других функций.

Сложность поставленной задачи заключалась в определенной специфике образовательного процесса в ведомственном вузе, связанной с необходимостью исполнения курсантами специальных обязанностей по службе (заступление в наряд по охране общественного порядка, занятия строевой и служебной подготовкой,

участие в большом количестве торжественных и спортивно-массовых мероприятий).

Важной особенностью организации обучения в ведомственном вузе является повышенный контроль успеваемости каждого курсанта по всем предметам, что отражается в виде оценок текущей успеваемости выставляемых преподавателем на каждом учебном занятии семинарского типа. Наличие в журнале учета учебных занятий неудовлетворительных оценок, а также пропусков занятий, влечет за собой обязанность курсанта ликвидировать задолженность в строго установленные сроки. Ликвидация задолженности закрывается индивидуально, успешным отчетом с оценкой по соответствующей теме. Поэтому при разработке информационно-структуры образовательной среды дистанционного обучения необходимо было предусмотреть удобный механизм дистанционного учета успеваемости курсантов по каждой теме изучаемой дисциплины, позволяющий отслеживать в динамике процесс освоения дисциплины, в том числе процесс исправления неудовлетворительных отметок и индивидуальной отработки каждого пропущенного занятия.

В связи с вышеизложенным, а также в связи с необходимостью обеспечения образовательного процесса части обучающихся по особой ведомственной специализации, предусматривающей работу со сведениями, составляющими государственную тайну, решалась дополнительная задача разграничения доступа обучающихся одного курса к дисциплинам и содержащимся в них информационным материалам, с учетом избранной ведомственной специализации.

Кроме того, необходимо было обеспечить преподавателям возможность создавать подходящим образом структурированные электронные курсы по каждой преподаваемой дисциплине со стандартным набором функциональных возможностей по их редактированию и наполнению учебно-методическими материалами, получению обратной связи от обучающихся в синхронном и асинхронном режиме.

Отталкиваясь от современного опыта ряда вузов по созданию новых электронных платформ для организации процесса обучения [1], [2], было принято принципиальное решение по осуществлению необходимых настроек, корректировок и модернизации под указанные выше требования одной из существующих платформ дистанционного обучения, подобно тому, как это было реализовано в работе [3].

## Методы исследования

При проведении работы использовались следующие методы исследования: теоретические (анализ, обобщение, формализация), эмпирические (эксперимент, наблюдение, сравнение).

## Результаты

В рамках решения поставленной задачи, был проведен всесторонний анализ доступных систем дистанционного обучения, удовлетворяющих описанным выше условиям организации образовательного процесса в ведомственном вузе, и, в качестве базовой платформы, выбрана система дистанционного обучения Moodle, которая обладает рядом следующих достоинств:

- это бесплатная система с открытым исходным кодом, которая позволяет создавать для нее полезные расширения различного назначения;
- подходит для организации дистанционного обучения крупного учебного заведения;
- позволяет создавать и редактировать хорошо структурированные курсы для дистанционного обучения;
- позволяет разграничивать права доступа как к системе в целом, так и к элементам и ресурсам курса и обеспечить индивидуальную траекторию обучения.

Однако в данной системе нет возможности организовать онлайн взаимодействие с обучающимися, поэтому такого рода взаимодействие реализовывалось с помощью доступных платформ для проведения видеоконференций со ссылкой в системе дистанционного обучения на страницах соответствующих курсов.

В ходе решения поставленной задачи, на сервере кафедры специальной техники и информационных технологий, была развернута система дистанционного обучения, в которой для всех обучающихся и преподавателей вуза были созданы личные кабинеты с безопасной аутентификацией пользователей, настроен дизайн сайта, прописаны пользовательские роли и разрешения системы в соответствии с заданным функционалом. Также для всех категорий пользователей были разработаны инструкции по работе в системе, которые доступны с любой страницы системы.

Для удобного размещения курсов (дисциплин) была спроектирована информационная структура системы дистанционного обучения

вуза (рис. 1), которая позволила контролировать процесс создания новых и корректировку

существующих курсов в соответствии с действующими учебными планами.



Рис. 1. Структура размещения курсов в системе дистанционного обучения

На верхнем уровне данной структуры располагаются факультеты вуза, далее происходит распределение по специальностям и направлениям подготовки, затем по формам обучения, по ведомственным специализациям или профилям и по курсам обучения. Как уже отмечалось выше, в вузе реализуется образовательная программа специалитета, в рамках которой осуществляется подготовка кадров в интересах обороны и безопасности государства, обеспечения законности и правопорядка. Поэтому специальность правоохранительная деятельность, в свою очередь, разделена на ведомственные специализации, одна из которых предусматривает освоение дисциплин, содержание которых предусматривает работу со сведениями, составляющие государственную тайну, что в соответствии с законодательством [4] существенно ограничивает реализацию вузом программы специалитета с применением электронного обучения, дистанционных образовательных технологий. Избранная информационная структура (рис. 1), оказывается доста-

точно гибкой по отношению к наполнению одного и того же учебного курса для обучающихся с разными ведомственными специализациями на основе подходящего разграничения прав доступа обучающихся только к соответствующему сектору информационной системы.

Остановимся на некоторых вопросах реализации образовательного процесса в рассматриваемой системе дистанционного обучения.

В системе предусмотрено, что в каждом курсе обучения размещаются дисциплины (электронные курсы) в соответствии с актуальными учебными планами на текущий учебный год (рис. 2). Каждая дисциплина проиндексирована и размещена в структуре курсов в соответствии с рабочими учебными планами по специальностям и направлениям подготовки, реализуемыми в вузе, с учетом ведомственной специализации (профиля подготовки).

Параллельно созданию структуры размещения электронных курсов, особое внимание было уделено работе по разграничению прав доступа к различным функциям системы для

каждой группы пользователей. Для выполнения этой задачи были скорректированы стандартные роли системы, то есть наборы разрешений, которые можно назначать пользователям в различных контекстах. Подчеркнем, что именно

комбинация ролей и контекста определяет способность конкретного пользователя совершать те или иные операции на заданной странице системы [5].

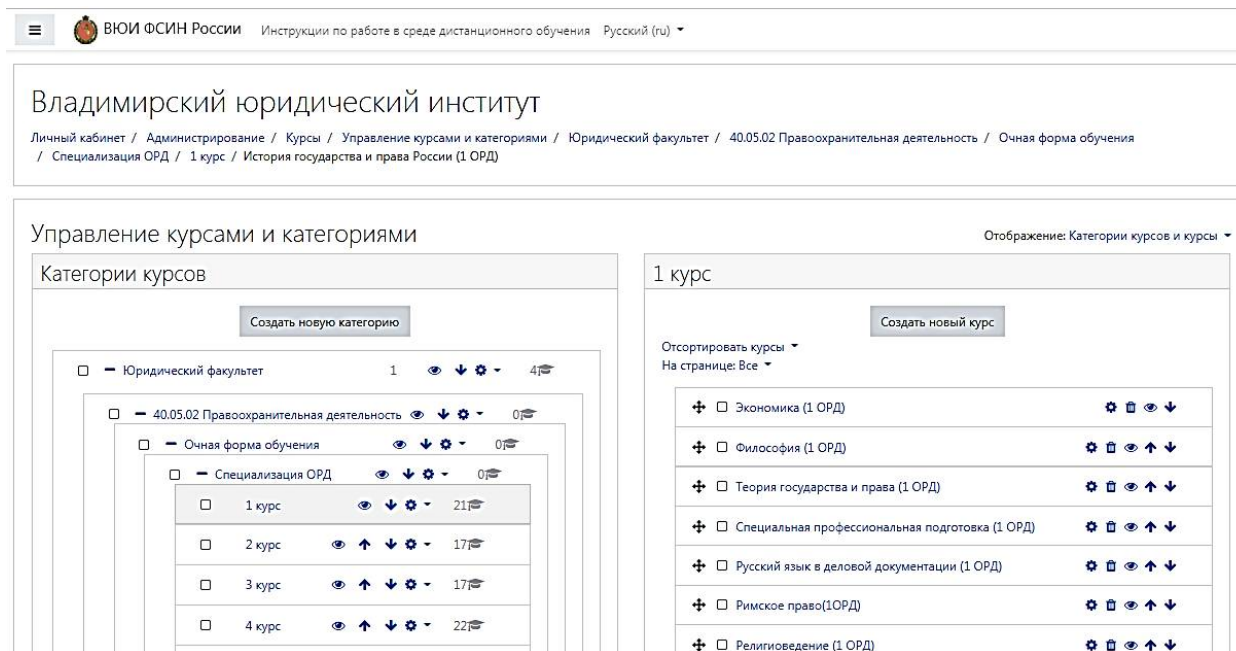


Рис. 2. Размещение дисциплин в системе дистанционного обучения

Отметим, что в системе Moodle имеется возможность добавлять новые роли пользователей, например, путем изменения существующих стандартных ролей, которые предлагаются в исходном варианте версии системы [6]. На вкладке Управление ролями раздела Администрирование (рис. 3) расположен список доступных ролей, каждую из которых можно отредактировать или удалить. При управлении ролями администратор имеет право отредактировать в каждой роли каждую из ее возможностей, которых более 350, то есть для семи стандартных ролей системы Moodle общее количество управляемых параметров превышает  $6 \cdot 10^{18}$  значений!

Для организации работы с содержанием курсов для профессорско-преподавательского состава кафедр были созданы роли «Руководитель» (для начальников кафедр) и «Преподаватель с правом редактирования» (для остальных преподавателей). Прототипом для обеих ролей послужила стандартная роль системы Moodle – «Учитель с правом редактирования». При этом роль «Руководитель» обладает большим количеством возможностей по сравнению с ролью «Преподаватель с правом редактирования» для обеспечения общего руководства по работе с

электронными курсами. Так, «Руководитель» обладает правом добавлять новых преподавателей на курс и удалять их, в отличие от «Преподавателя с правом редактирования».

Еще одной важной ролью, позволяющей создавать новые курсы на уровне факультетов, является роль «Создатель курсов», модифицированная нами на основе одноименной стандартной роли, которой были переданы некоторые расширенные права роли «Управляющий».

Применительно к специфике нашего вуза, была сгенерирована совершенно новая роль «Учебный отдел», которая предоставляет права мониторинга активности всех участников образовательного процесса (и преподавателей, и обучающихся) и позволяет оценивать наличие учебных материалов, правильность их размещения в структуре созданных электронных курсов, своевременность выполнения заданий обучающимися, наличие выставленных отметок, необходимых комментариев к ним со стороны преподавателей. Подчеркнем, что пользователи, которым присваивается роль «Учебный отдел», несмотря на широкие права по мониторингу, не имеют прав на изменение учебного контента, исправление выставленных оценок и других функций по организации обучения по

дисциплине, – они выступают лишь в качестве наблюдателей.

Таким образом, всем обучающимся была присвоена роль «Студент», всем преподавателям – роль «Преподаватель с правом редактирования», работникам, закрепленными за каж-

дым факультетом с целью создания и корректировки курсов, – роль «Создатели курсов», а сотрудникам учебного отдела – роль «Учебный отдел». Кроме того, сотрудниками с ролями «Администратор» и «Управляющий» обеспечивается общая организацию работы системы.











































Управление ролями	Разрешить назначение ролей	Разрешить переопределение ролей	Разрешить переключение между ролями	Разрешить просмотр роли
Роль 	Описание	Краткое название	Редактировать	
Управляющий	Управляющие имеют доступ к курсу и могут изменять его. Они, как правило, не участвуют в курсах.	manager	  	
Создатель курса	Создатели курсов могут создавать новые курсы.	coursecreator	   	
Учитель	Учителя могут делать в курсе всё, в том числе изменять элементы курса и оценивать студентов.	editingteacher	   	
Ассистент (без права редактирования)	Ассистент может преподавать в курсах и выставлять оценки, но он не может изменять содержание курса.	teacher	   	
Студент	Обычно студенты обладают меньшим набором прав в рамках курса.	student	   	
Руководитель		rukovoditel	   	
Преподаватель (с правом редактирования)		prepodavatel	   	
Гость	Обычно гости имеют минимальный набор прав и не могут нигде вводить текст.	guest	  	
Создатели курсов		coursecreator2	   	
Учебный отдел		uchebotdel	   	
Аутентифицированный пользователь	Все пользователи, вошедшие в систему	user	  	

Рис. 3. Управление ролями в системе Moodle

Следующим этапом решения поставленной задачи стала работа по наполнению системы дистанционного обучения вуза содержательным учебным материалом, структурированным в соответствии с рабочими программами дисциплин и утвержденным расписанием занятий.

Весь учебный материал дисциплины (электронного курса) разделен на темы. В каждой теме располагаются пассивные ресурсы («Файл», «Папка», в которых размещен теоретический материал лекций по теме, презентации, видеофрагменты, гиперссылки на видеоконференции) и интерактивные элементы («Лекция», «Задание», «Тест»), позволяющие получить обратную связь от обучающихся (рис. 4). Преподаватель, при желании, может использовать и другие интерактивные ресурсы системы, например «Форум», «Семинар», «Глоссарий».

Элементы, размещенные в теме, логически связаны друг с другом: каждое следующее практическое задание выполняется только при условии получения проходного балла за

предыдущее, доступ же к первому практическому заданию открывается только после прохождения интерактивной лекции, предваряющей серию практических заданий. Каждую серию практических заданий рекомендуется завершать выполнением теста, доступ к которому возможен только после выполнения всех заданий. Такой порядок функционирования системы дистанционного обучения ведомственного вуза обеспечивает требуемую наполняемость оценок по каждому предмету, своевременное закрытие задолженностей обучающихся по отдельным темам. В конечном счете, такое построение курса позволяет организовать все виды текущего контроля успеваемости обучающихся в период проведения занятий в дистанционном формате и обеспечить наиболее полную и объективную оценку знаний, умений и навыков, полученных в ходе занятий и в процессе самостоятельной работы, степени сформированности элементов соответствующих компетенций, закрепленных в руководящих документах.



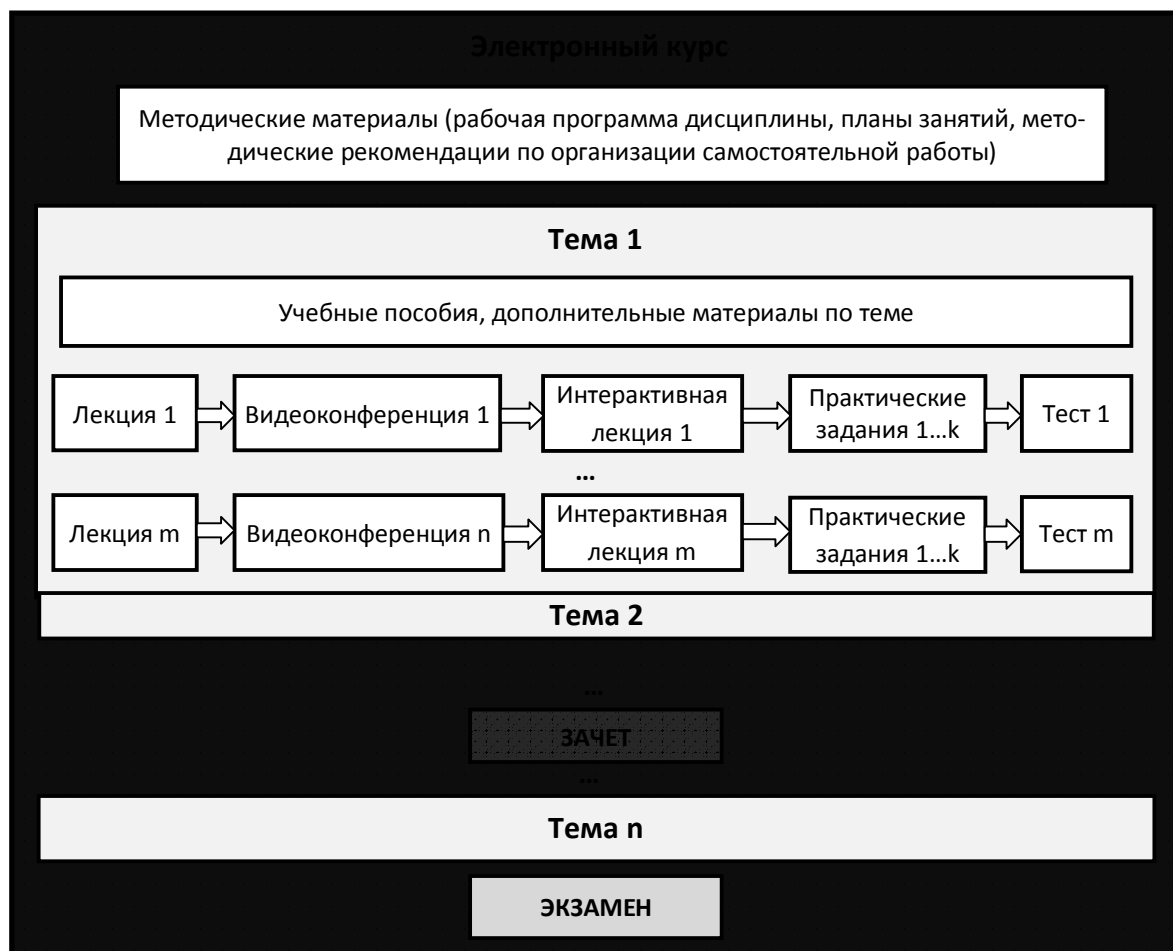


Рис. 4. Структурная схема электронного курса

Отметим, что промежуточная аттестация по дисциплине в виде зачета может быть успешно реализована, как итоговый тест по всем темам курса, вопросы для которого выбираются случайным образом из категорий и подкатегорий банка вопросов по каждой изученной теме электронного курса.

При этом в процессе реализации образовательного процесса в созданной системе дистанционного обучения постепенно формируется уникальная база данных тестовых заданий по дисциплине, которая полностью охватывает весь материал учебного курса и легко адаптируется к проведению любых форм контроля знаний.

В рамках настоящего исследования, автором была проведена специальная экспериментальная работа по информационному сопровождению учебной дисциплины «Информационные технологии в юридической деятельности» для курсантов первого курса ведомственного вуза, реализуемой в дистанционном формате. Особое внимание при этом было уделено

составлению разнообразных тестовых вопросов и расчетных заданий для проведения текущего контроля знаний по каждой теме. При составлении тестов были учтены рекомендации [7] по формированию тестовых заданий повышенной стойкости относительно случайного угадывания правильных ответов. В результате была сформирована реляционная база данных из 500 тестовых вопросов различного типа, реализованная на языке СУБД LMS Moodle 3.8, которая успешно прошла государственную регистрацию в установленном законодательством порядке [8].

Промежуточная аттестация в виде экзамена реализуется в системе в виде элемента «Задание», ответом на который является письменная работа обучающегося. Причем подготовка ответа и сам ответ по билету происходит в условиях синхронного взаимодействия в режиме реального времени в форме видеоконференции.

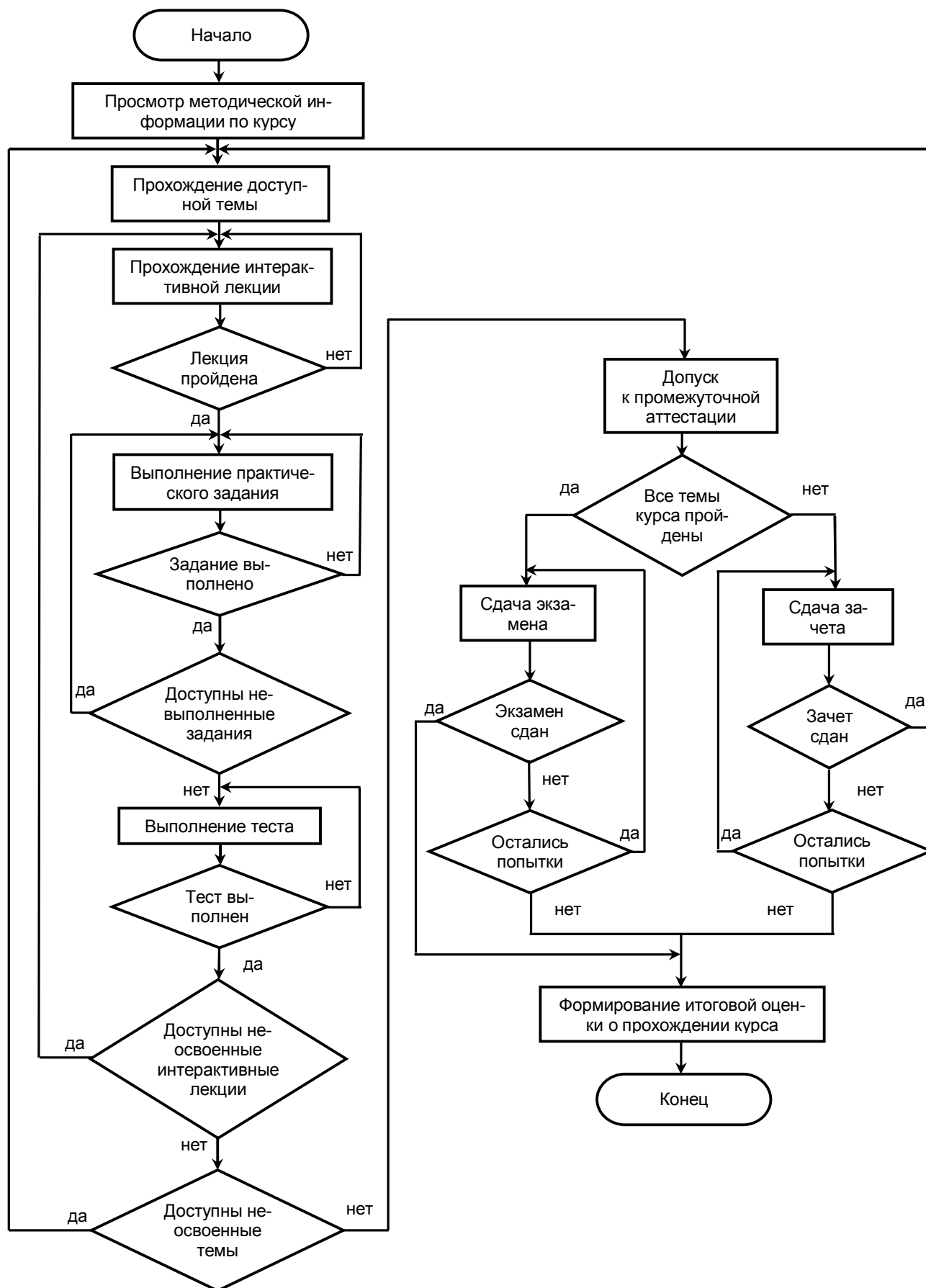


Рис. 5. Алгоритм прохождения курса



Приведенная выше структурная схема электронного курса позволяет описать алгоритм его успешного прохождения в виде блок-схемы (рис. 5). На схеме представлены все этапы текущего и промежуточного контроля по дисциплине. Промежуточный контроль представлен в виде зачета в одном семестре и экзамена в другом. При неудачном прохождении какого-либо интерактивного элемента, связанного с текущим контролем успеваемости, обучающийся может повторить попытку его выполнения. Для элементов, связанных с промежуточным контролем, количество попыток прохождения соответствует требованиям локального акта вуза о порядке проведения промежуточной аттестации.

Следуя указанному алгоритму, обучающийся может осваивать электронный курс, как под управлением преподавателя, так и самостоятельно.

Для удобства контроля прохождения курса преподавателем удобно использовать разграничение прав доступа для различных групп пользователей. Система дистанционного обучения позволяет формировать сложные логические условия, которые ставят ограничения по различным параметрам или их комбинациям: по датам доступа, при выполнении предыдущих элементов и ресурсов курса, по принадлежности к определенной группе обучающихся, на основе полей в профиле обучающегося. Например, ограничение доступа по датам и группам, позволяет настроить график прохождения электронного курса в соответствии с расписанием занятий, что особенно важно для ведомственного вуза.

Возвращаясь к упомянутому выше эксперименту автора, отметим, что экспериментальный электронный курс «Информационные технологии в юридической деятельности» был сконструирован в соответствии со схемой, представленной на рис. 4, а курсанты первого курса придерживались предложенного алгоритма прохождения данного курса исключительно в дистанционном формате (рис. 5). В журнале учебных занятий были выставлены оценки, отражающие результаты текущего и рубежного контроля успеваемости обучающихся по дисциплине, также выставлена итоговая оценка за курс. Промежуточная аттестация в виде экзамена была проведена в дистанционном формате, в режиме онлайн, с использованием видеоконференцсвязи.

С целью проверки остаточных знаний и глубины сформированности соответствующих компетенций по данному предмету, через три месяца после сдачи экзамена, автором на основе указанной выше базы данных тестовых заданий

по дисциплине, было проведено специальное тестирование 35 курсантов-первокурсников. Из 500 заданий, входящих в базу, автоматически формировалась случайная бесповторная выборка объемом в 18 заданий – три тестовых вопроса по каждой из 6 тем. Фактически каждому курсанту генерировался индивидуальный билет тестового типа. Средний балл по дисциплине в период сессии составил 3,37 баллов, а при проверочном тестировании остаточных знаний среди тех же обучающихся – 3,26 баллов. Сравнение полученных результатов с показателями успеваемости, зафиксированными на экзамене, показали высокий уровень остаточных знаний.

### Заключение

Таким образом, поставленная задача по созданию системы дистанционного обучения ведомственного вуза была успешно решена. Ключевым моментом при создании подобных систем, на наш взгляд, является разработка подходящей информационной структуры и определение оптимального набора пользовательских ролей в системе, что позволяет организовать образовательный процесс большого вуза, характеризующегося сложной структурой и реализацией нескольких профессиональных образовательных программ.

В ходе данного исследования, на примере конкретной учебной дисциплины, был описан авторский алгоритм прохождения обучающимися электронного учебного курса, который обеспечил, как указано выше, хороший уровень остаточных знаний по этой дисциплине.

В перспективе представляется целесообразным провести аналогичное исследование, состоящее в сравнении показателей успеваемости по данной дисциплине, полученных в ходе экзаменационной сессии и последующего тестирования остаточных знаний обучающихся при реализации обучения в очном или смешанном форматах.

### Литература

1. Комлева Н.В., Вилявин Д.А. Цифровая платформа для создания персонализированных адаптивных онлайн курсов // Открытое образование. 2020. Т. 24. № 2. С. 65-72.
2. Разработка электронной платформы для организации образования онлайн на основе компетентностного подхода / С.А. Коваленко, Н.И. Гребенникова, В.А. Малиновкин, П.С. Скочко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 3. С. 25-31.
3. Азарченков А.А., Козленкова А.А. Особенности применения системы управления электронным обучением Moodle в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» // Эргодизайн. 2019. № 2(4). С. 68-74.

4. Об образовании в Российской Федерации: Федер. закон от 29 дек. 2012 г. № 273-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 2012. № 53, ст. 7598.

5. Хорошева А.В. Организация интерактивного курса информатики в системе дистанционного обучения // Информационные технологии в УИС. 2020. № 4. С. 66-72.

6. СДО Moodle. URL: [https://docs.moodle.org/310/en/Roles\\_and\\_permissions](https://docs.moodle.org/310/en/Roles_and_permissions) (дата обращения 31.01.2022).

7. Рычаго М.Е., Тихомиров Р.Н. Некоторые математические вопросы контроля знаний в системах дистанционного обучения // Информационные технологии в

УИС. 2020. № 3. С. 16-22.

8. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622925 Российской Федерация. База данных тестовых заданий по дисциплине «Информационные технологии в юридической деятельности»: № 2021622213: заявл. 19.10.2021: опубл. 13.12.2021 / А.В. Хорошева, К.В. Скворцов; заявитель Федеральное казенное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский юридический институт федеральной службы исполнения наказаний».

Поступила 03.02.2022; принята к публикации 19.04.2022

#### Информация об авторах

**Хорошева Анна Владимировна** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры специальной техники и информационных технологий, Владимирский юридический институт ФСИН России (600020, Россия, г. Владимир, ул. Большая Нижегородская, 67е), e-mail: [d\\_anya@list.ru](mailto:d_anya@list.ru)

### CREATING AN INFORMATION SYSTEM FOR DISTANCE LEARNING AT A DEPARTMENTAL HIGHER EDUCATION INSTITUTION

**A.V. Khorosheva**

**Vladimir Law Institute of the FPS of Russia, Vladimir, Russia**

**Abstract:** the article discusses the process of developing a distance learning system for the effective organization of the educational process of a departmental university, based on the Moodle distance learning platform. In the course of solving the task, we developed the information structure of the electronic courses of the Vladimir Law Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, created new system user roles, which make it possible to make work in the system safer and more convenient, including from the point of view of controlling the educational process as a whole and the activity of each user. For professors, a typical structure of an electronic course is proposed, which makes it possible to conveniently place methodological materials on the disciplines taught, receive feedback from students, and carry out various types of control over the formation of students' competencies in accordance with the work programs of disciplines. Such a structure makes it possible to reflect the results of the current monitoring of the progress of students in the study log, which is a distinctive feature of the organization of education in a departmental university. For students, we proposed an author's algorithm for completing an electronic course, which can be implemented both in distance or blended learning formats, and in full-time learning. On the example of information support of distance learning for the discipline "Information technologies in legal activity", the process of forming a database of test items is described. Experimental testing, conducted by the author among students following the results of studying the discipline "Information Technologies in Legal Activity", showed the effectiveness of the chosen approach to organizing electronic courses in the electronic information and educational environment of a departmental university

**Key words:** e-learning system, distance learning, e-course, course completion algorithm, creation and distribution of roles in the system

#### References

1. Komleva N.V., Vilyavin D.A. "Digital platform for creating personalized adaptive online courses", *Open Education*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 65-72.
2. Kovalenko S.A., Grebennikova N.I., Malinovkin V.A., Skochko P.S. "Development of an electronic platform for organizing online education based on a competency-based approach", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 3, pp. 25-31.
3. Azarchenkov A.A., Kozlenkova A.A. "Features of the application of the Moodle e-learning management system in FSBEI HE «Bryansk State Technical University»", *Ergodesign*, 2019, no. 2(4), pp. 68-74.
4. "On education in the Russian Federation: Feder. law of 29 Dec. 2012 No. 273-FZ", *Collection of Legislation of the Russian Federation*, 2012, no. 53, art. 7598.
5. Khorosheva A.V. "Organization of an interactive informatics course in the system of distance learning", *Information Technologies in the UIS (Informatsionnye tekhnologii v UIS)*, Tver, 2020, no. 4, pp. 66-72.
6. LMS Moodle, available at: [https://docs.moodle.org/310/en/Roles\\_and\\_permissions](https://docs.moodle.org/310/en/Roles_and_permissions) (date of access 31.01.2022).
7. Rykago M.E., Tikhomirov R.N. "Some mathematical issues of knowledge control in distance learning systems", *Information Technologies in the UIS (Informatsionnye tekhnologii v UIS)*, Tver, 2020, no. 3, pp. 16-22.
8. Khorosheva A.V., Skvortsov K.V. "Database of test tasks in the discipline «Information technologies in legal activity»" ("База данных тестовых заданий по дисциплине «Информационные технологии в юридической деятельности»"), certificate of state registration of the database No. 2021622925 Russian Federation, no. 2021622213: Appl. 10/19/2021: publ. December 13, 2021, applicant Federal State Educational Institution of Higher Education «Vladimir Law Institute of the Federal Penitentiary Service».

Submitted 03.02.2022; revised 19.04.2022

#### Information about the author

**Anna V. Khorosheva**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Vladimir Law Institute of the FPS of Russia of the FPS of Russia (67e Bolshaya Nizhegorodskaya str., Vladimir 600020, Russia), e-mail: [d\\_anya@list.ru](mailto:d_anya@list.ru)

**ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА С SIW ДЛЯ СЕТЕЙ 5G**

**С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, К.А. Бердников<sup>1</sup>, С.И. Деревянкин<sup>1</sup>, Е.В. Папина<sup>1</sup>,  
Н.Б. Смольянов<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** предлагается конструкция управляемого волновода, интегрированного в диэлектрик (SIW), для задач связи в сетях 5G n261 (27.5-28.35 ГГц). Благодаря предложенной конструкции становится возможным сформировать излучение в трех направлениях для обеспечения наилучшего качества связи с абонентом сотовой связи. Предложенная конструкция может быть использована для создания минисот, которые обеспечивают покрытие сетями доступа к 5G на небольших площадях. С использованием тонкого диэлектрика удается достичь низкого профиля антенной системы и управления путем применения системы электромагнитов, которые извлекают металлические штыри, формирующие волновод. Путем извлечения штырей производится открытие канала распространения электромагнитных волн, что, в свою очередь, позволяет подключить выбранный антенный элемент. В результате было получено, что итоговая система обладает высоким КПД, высокой эффективностью излучения. Полученные результаты подтверждаются картинками диаграмм направленности, электромагнитного поля, графиками матрицы рассеяния. Использование высокостабильного диэлектрика позволило достичь уровня возвратных потерь менее -10 дБ в диапазоне рабочих частот, а коэффициентов передачи не меньше -3 дБ, что позволяет получить наиболее оптимальные характеристики разработанной конструкции антенны с SIW

**Ключевые слова:** волновод, интегрированный в диэлектрик (SIW), 5G, формирование луча

**Введение**

Волновод, интегрированный в подложку (SIW), является одним из наиболее эффективных способов передачи электромагнитной энергии в системах высокочастотной связи, так как в процессе распространения ЭМВ не происходит паразитного излучения в окружающую среду. Благодаря всем особенностям конструкции, а также малым размерам такая конструкция является наиболее оптимальной для задач связи в миллиметровом диапазоне волн. Однако во многих задачах требуется осуществлять управление характеристиками с подключениями к нескольким антенным элементам.

Пример управляемой конструкции на основе SIW приводится в работе [1], когда благодаря изменению емкости на варикапе удается добиться смещения рабочих характеристик антенн бегущей волны. Но использование варикапов может быть ограничено на частотах работы сетей 5G, так как достаточно большие радиокомпоненты могут приводить к искажению характеристик радиоволн, помимо этого рабо-

чий диапазон таких компонентов как правило не превышает X диапазона (8-12 ГГц), что приводит к отсутствию возможности управления в миллиметровом диапазоне радиоволн.

В работе [2] авторы предлагают конструкцию на основе SIW для щелевой антенной решетки с оптоуправляемым переключателем, который позволял открывать и закрывать излучающие щели, что позволило бы осуществлять управление диаграммами направленности антенны, при этом благодаря особенностям оптоуправляемых ключей отсутствует ограничение по диапазону рабочих частот. Недостатком же такой структуры является невозможность осуществить направленное излучение в нескольких направлениях, так как щели формируются, как правило, только на одной стороне структуры.

В работе [3] авторами предлагается конструкция фильтра на основе SIW структуры с MEMS управлением, при этом удается произвести выбор излучаемой моды электромагнитной волны, что, в свою очередь, позволяет обеспечить управление характеристиками излучения. Недостатком такой конструкции является сложность исполнения, а также необходимость интеграции в системе заземления SIW

дорожек для питания радиокomпонентов на плате, что приводит к дополнительному зашумлению системы.

Таким образом, видно, что SIW структуры имеют большое число преимуществ по сравнению с классической микрополосковой линией, однако требуется выбрать способ управления сформированными каналами в диэлектрике.

### Конструкция SIW с 5G антеннами

В процессе исследования была разработана SIW структура для работы в диапазоне частот 5G n261 (27.5-28.35 ГГц) с возможностью переключения каналов и направлением электромагнитных волн в одном из трех направлений путем подъема штырей с использованием электромагнитов – рис. 1.

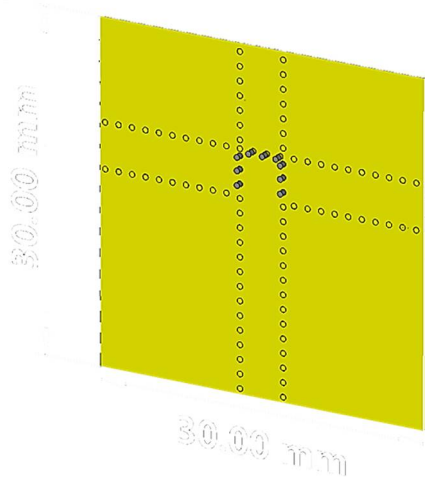


Рис. 1. Модель управляемого SIW

Предлагаемая конструкция SIW реализована на пластине диэлектрика Rogers RO4003C толщиной 0.305 мм, медные штыри, которые формируют каналы передачи, имеют диаметр 0.5 мм, а расстояние между соседними 0.75 мм. Таким образом удастся достичь оптимальных характеристик SIW структуры для исследуемого диапазона частот, так, полученные размеры SIW волновода составили 4x0.305 мм. В результате этого было получено, что в целевом диапазоне частот  $S_{11}$  параметры менее -10 дБ – рис. 2а, а коэффициенты передачи в прямом направлении  $S_{21}$  (рис. 2б), вправо и влево  $S_{31}$  ( $S_{41}$ ) (рис. 2б) не менее -3 дБ.

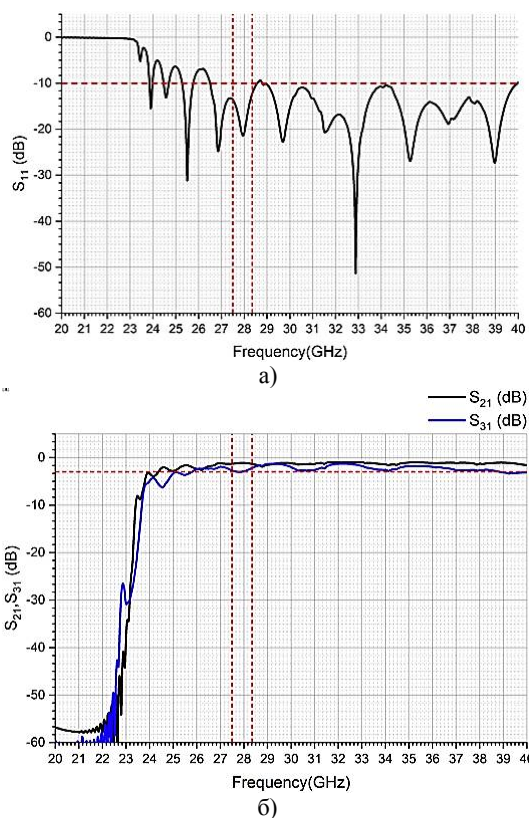


Рис. 2. Характеристики матрицы рассеяния для структуры: а) возвратные потери; б) коэффициенты передачи

На основе полученной системы была сформирована ячейка с тремя антенными элементами для сетей 5G, которая приводится на рис. 3.

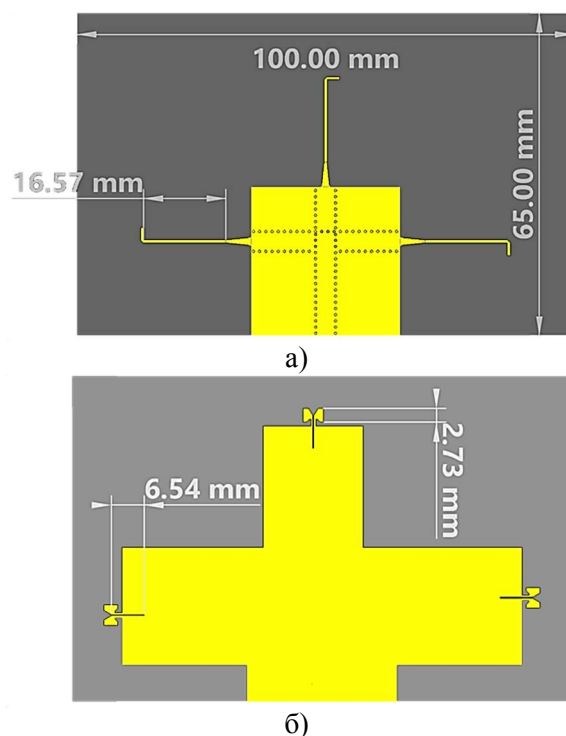


Рис. 3. Конструкция антенной системы с SIW структурой



На основе переключаемых режимов удается достичь управления характеристиками распространения радиоволн, картины Е-поля приводятся на рис. 4 для всех режимов работы системы.

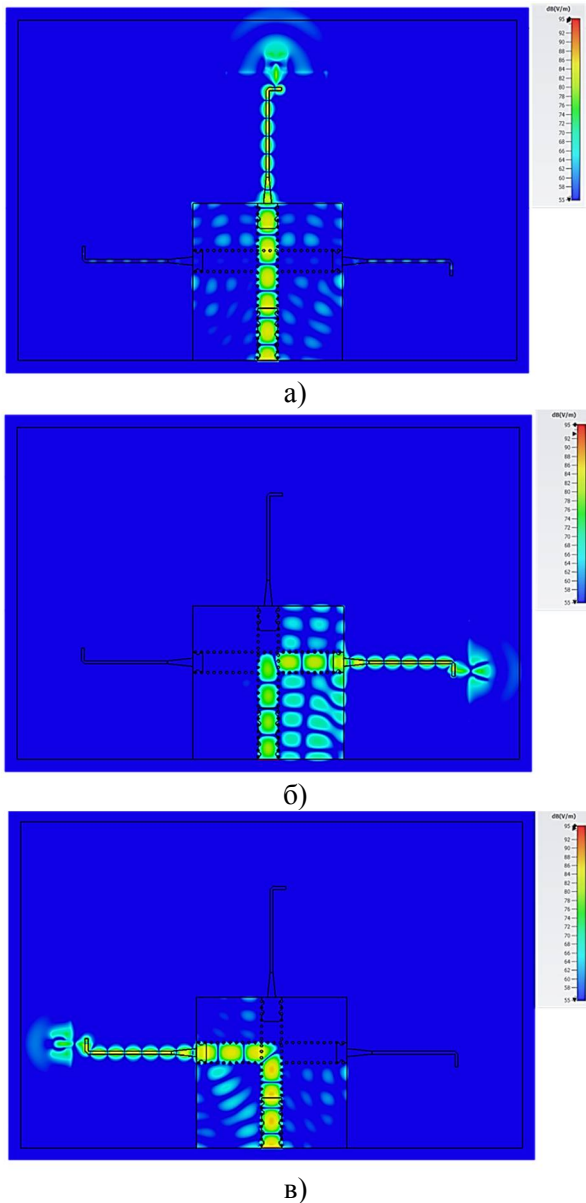


Рис. 4. Картины полей в разработанной системе

Таким образом видно, что благодаря переключению режимов работы SIW структуры удастся сформировать управление характеристиками протекающих электромагнитных волн, а следовательно, и формировать луч в трех направлениях, что подтверждается диаграммой направленности – рис. 5.

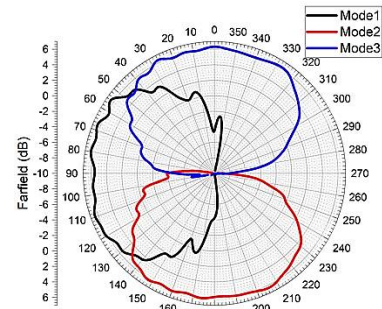


Рис. 5. Диаграммы направленности антенны во всех режимах

Как видно из полученных результатов, удастся сформировать антенну с тремя переключаемыми лучами, что позволяет сформировать направленный луч (технология формирования луча), что является особо востребованным для базовых станций сетей 5G, так, благодаря особенностям полученной низкопрофильной антенны, удастся сформировать динамически перестраиваемую управляемую антенную систему с возможностью слежения за устройством. Во всем диапазоне рабочих частот КПД всей системы не опускался ниже 70%; КНД антенны составлял 6.33 дБи, ширина главного лепестка 110°. Таким образом, полученная система может быть использована для минисот сетей 5G.

## Заключение

Антенны с динамически управляемыми параметрами являются востребованными во всех современных системах связи, особенно в миллиметровых диапазонах радиоволн. Благодаря предложенной конструкции становится возможным сформировать антенную систему с тремя направлениями излучения для минисоты сетей 5G. Выбранная конструкция и способ переключения являются наиболее простыми, так как ввиду малой высоты медных штырей становится возможным обеспечить быстрый подъем из диэлектрика, а следовательно, и быстрое переключение режимов излучения.

## Литература

1. Jang T., Lim S. Novel Capacitor-Loaded Substrate-Integrated-Waveguide Structure and Its Electronically Controlled Leaky-Wave Antenna Application // *Electromagnetics*. 2014. № 34. 10 p.
2. Optically Controlled Reconfigurable Substrate Integrated Waveguide Slot Array Antenna for 5G Applications / R. Ebrahimzadeh, B. Zakeri, M. Yousefzadeh, S.E. Hosseiniinejad // *2020 10th International Symposium on Telecommunications (IST)*. 2020. Pp. 107-110.

3. Sekar V., Armendariz M., Entesari K. A 1.2-1.6-GHz substrate-integrated-waveguide RF MEMS tunable filter // *Microwave Theory and Techniques IEEE Transactions on*. 2011. №59. pp. 866 - 876.

4. Half-mode versus folded SIW filters: Modeling and design / S. Moscato, N. Delmonte, L. Silvestri, M. Bozzi, L. Perregrini // 2015 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). 2015. Pp. 1-3.

5. High Gain 4x4 SIW Passive Phased Array Antenna / Z.R. Omam, W.M. Abdel-Wahab, S. Gigoyan, S. Safavi-

Naeini // 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. 2020. Pp. 45-46.

6. Kumar A. SIW Based Bandpass Filter Integrated H-Plane Horn Antenna for K Band Applications // 2020 6th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC). 2020. Pp. 306-309.

7. Esmacili M., Bornemann J. Coaxial-fed dual-layer SIW horn antenna with improved E-plane radiation pattern // 47th European Microwave Conference (EuMC). 2017. Pp. 66-69.

Поступила 14.10.2021; принята к публикации 15.04.2022

#### Информация об авторах

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

**Ищенко Евгений Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Бердников Кирилл Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Деревянкин Сергей Игоревич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); тел. +7(473)243-77-29, e-mail: derevyankin\_sergej@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8883-8446>

**Папина Елизавета Владимировна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

**Смольянов Никита Борисович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); стажер, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

### CONFIGURABLE ANTENNA SYSTEM WITH SIW FOR 5G NETWORKS

S.M. Fyedorov<sup>1,2</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, K.A. Berdnikov<sup>1</sup>, S. I. Derevyankin<sup>1</sup>, E.V. Papina<sup>1</sup>,  
N.B. Smolyanov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>JSC “Concern “Sozvezdie”, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article proposes the design of a substrate integrated waveguide (SIW) for communication tasks in 5G n261 networks (27.5-28.35 GHz). Thanks to the proposed design, it becomes possible to form radiation in three directions for the best quality of communication with a cellular subscriber. The proposed design can be used to create mini cells that provide coverage with 5G access networks in small areas. Through the use of a thin dielectric, it is possible to achieve a low profile of the antenna system and control the use of a system of electromagnetic waves that extract the metal rods that form the waveguide. Removing the pins opens the channel for the propagation of electromagnetic waves, which in turn makes it possible to connect the selected antenna element. As a result, we found that the final system has a high efficiency, high radiation efficiency. The results obtained are confirmed by the pictures of the directional diagrams, the electromagnetic field, the graphs of the scattering matrix. The use of a highly stable dielectric ensures that the return loss level is less than -10 dB in the operating frequency range, and the transmission coefficients are not less than -3 dB, which makes it possible to achieve the most optimal characteristics of the developed antenna design with SIW

**Key words:** substrate integrated waveguide (SIW), 5G, beamforming

#### References

1. Jang T., Lim S. “Novel capacitor-loaded substrate-integrated-waveguide structure and its electronically controlled leaky-wave antenna application”, *Electromagnetics*, 2014, no. 34, 10 p.

2. Ebrahimzadeh R., Zakeri B., Yousefzadeh M., Hosseinienejad S.E. “Optically controlled reconfigurable substrate integrated waveguide slot array antenna for 5G applications”, *2020 10th International Symposium on Telecommunications (IST)*, 2020, pp. 107-110.

3. Sekar V., Armendariz M., Entesari K. "A 1.2-1.6-GHz substrate-integrated-waveguide RF MEMS tunable filter", *Micro-wave Theory and Techniques IEEE Transactions on*, 2011, no. 59, pp. 866–876.
4. Moscato S., Delmonte N., Silvestri L., Bozzi M., Perregrini L. "Half-mode versus folded SIW filters: Modeling and design", *2015 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, 2015, pp. 1-3.
5. Omam Z.R., Abdel-Wahab W.M., Gigoyan S., Safavi-Naeini S. "High gain 4x4 SIW passive phased array antenna", *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, 2020, pp. 45-46.
6. Kumar A. "SIW based bandpass filter integrated H-plane horn antenna for K band applications", *2020 6th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, 2020, pp. 306-309.
7. Esmacili M., Bornemann J. "Coaxial-fed dual-layer SIW horn antenna with improved E-plane radiation pattern", *2017 47th European Microwave Conference (EuMC)*, 2017, pp. 66-69.

Submitted 14.10.2021; revised 15.04.2022

#### Information about the authors

**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Associate Professor, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

**Evgeniy A. Ishchenko**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Kirill A. Berdnikov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Sergey I. Derevyankin**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: derevyankin\_sergej@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8883-8446>

**Elizaveta V. Papina**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

**Nikita B. Smolyanov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); trainee, JSC "Concern "Sozvezdie" (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru



## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛЁТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ С МОДУЛЯЦИЕЙ QAM И OFDM

Д.Г. Пантенков<sup>1</sup>, М.А. Загнетко<sup>2</sup>, В.П. Литвиненко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «Кронштадт», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в настоящее время особую актуальность приобрели роботизированные системы (РС) и комплексы различного базирования, в том числе беспилотные летательные аппараты (БПЛА). При этом любое роботизированное средство оснащается широким набором полезных нагрузок (датчиков), с которых в режиме реального времени представляется возможным передавать информацию об окружающей обстановке удалённому оператору, который посредством её анализа и интерпретации будет принимать те или иные решения. С учётом того, что современные датчики имеют очень высокие разрешающие способности, то объём информации, который записывается во внутреннюю память и параллельно передается удалённому оператору по радиоканалу, может составлять сотни мегабит или даже единицы гигабит. В таком случае актуальной становится задача оптимального выбора сигнально-кодированной конструкции (СКК) радиосигнала в канале сброса целевой информации, от которой принципиальным образом зависят достижимые пропускные способности. Рассмотрены результаты лётных испытаний в части передачи целевой информации с лётно-подъёмного средства (ЛПС) на стационарный наземный пункт управления и обработки информации (НПУОИ), перспективный метод модуляции радиосигнала на базе OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением радиоканалов), а также представлено сравнение энергетических параметров радиолинии при передаче целевой информации с помощью классической квадратурной амплитудной модуляции QAM и OFDM сигнала, когда множество находящихся в общей полосе поднесущих модулированы модуляциями с различными скоростями кодирования

**Ключевые слова:** лётно-подъёмное средство, радиоканал сброса целевой информации, радиосигнал, модуляция, QAM, OFDM, скорость передачи целевой информации, спектральная эффективность радиосигнала, энергетические запасы, результаты лётных испытаний, аппаратная реализация, антенны, СВЧ-модули

### Введение

В работах [1-19] представлены принципы построения и технические характеристики радиолиний передачи командно-телеметрической и целевой информации от датчиков роботизированных систем на пункты приёма и обработки информации. При этом в качестве роботизированных систем в работах [1-19] преимущественно рассматриваются комплексы с беспилотными летательными аппаратами (КБПЛА), хотя представленные подходы и принципы организации радиосвязи с учётом имеющейся специфики различных видов РС могут быть распространены и на роботов не только авиационного базирования.

В работах [20-26] системно рассмотрены вопросы современного состояния и перспектив развития робототехнических комплексов, анализа средств и способов противодействия функционированию БПЛА с целью уменьшения эффективности их целевого применения в части радиоэлектронной борьбы (РЭБ) – радиоэлектронного подавления и поражения

приёмо-передающей аппаратуры из состава комплексов связи.

В работе [5] представлены основные технические требования к радиоканалам радиосвязи и информационного обмена применительно к БПЛА, систематизированы и проанализированы основные требования к форматам видеоизображений и стандартам передачи данных на примере семейства стандартов STANAG. Согласно [5], для передачи видеопотоков с разрешением  $1920 \times 1080 \times (24p)$  30p понадобится минимальная пропускная способность 20 Мбит/с для одного источника сигнала. В качестве основной проблемы при реализации радиоканалов связи с БПЛА обозначено ограничение частотного ресурса при постоянном росте требований к скорости передачи данных, для чего необходимы новые методы минимизации потребной полосы частот или совместного использования единой полосы частот различными БПЛА в составе группы.

В работе [19] представлены результаты расчётов и имитационного моделирования по выбору оптимальных сигнально-кодированных конструкций в командно-телеметрическом радиоканале БПЛА. По результатам моделирования

показано [19], что с позиций обеспечения высокого уровня помехозащищённости рационально выбирать СКК в виде широкополосного радиосигнала с прямым расширением спектра псевдослучайной последовательностью с двухпозиционной фазовой модуляцией BPSK со скоростью кодирования не более  $1/3$ .

По результатам анализа известной литературы [1-19] можно сделать вывод, что данная тематика рассматривается преимущественно в теоретическом аспекте и в настоящее время не в полной мере систематизированы, обобщены и представлены результаты наземных отработок и лётных испытаний комплексов радиосвязи в составе КБПЛА в части анализа полученных результатов по передаче потока данных с БПЛА именно в условиях реального применения.

В данной статье не рассматривается командно-телеметрический радиоканал обмена информацией между БПЛА и НПУОИ, имеющих свою специфику в части требований к его помехоустойчивости, крипто- и имитостойкости как защите от перехвата и т.д.

В данной статье значительное внимание уделяется современным возможностям передачи (сброса) по высокоскоростному радиоканалу именно целевой информации с БПЛА (как частный возможный случай РС) на НПУОИ. В качестве СКК в радиоканале передачи (сброса) информации от целевых нагрузок могут быть использованы самые различные СКК – QAM, PSK с переменной позиционностью, OFDM и пр.

В работе [8] подробно представлены принципы формирования и кодирования перспективного OFDM сигнала, аппаратная реализация антенных систем для обеспечения его приёма и передачи, а также обозначены его основные преимущества перед другими СКК, подтверждённые результатами компьютерного моделирования. Для выбранных исходных данных, ограничений и допущений, а также условий моделирования была показана расчётная скорость передачи целевой информации на одной несущей около 15-20 Мбит/с.

К основным преимуществам OFDM сигнала, по сравнению со схемой с одной несущей, можно отнести способность противостоять сложным условиям в радиоканале – бороться с узкополосными помехами и частотно-избирательным затуханием, вызванным многолучевым характером распространения, без использования сложных фильтров-эквалайзеров. Канальная эквализация упрощается вследствие того, что OFDM-сигнал может рассматриваться как множество медленно модулируемых узко-

полосных сигналов, а не как один быстро модулируемый широкополосный радиосигнал. Низкая символьная скорость делает возможным использование защитного интервала между символами, что позволяет справляться с временным рассеянием и устранять межсимвольную интерференцию (МСИ) [8].

В данной статье представлены результаты реальных лётных испытаний комплекса средств радиосвязи (КСР), целью которых было получение статистического массива данных по результатам полётов на беспилотном носителе и летающей лаборатории и проведение сравнительного анализа энергетического баланса при использовании модуляций QAM и OFDM.

## 1. Научно-технический и технологический задел предприятий отечественной промышленности

На сегодняшний день крупные отечественные производители радиоэлектронной аппаратуры уже сформировали достаточный научно-технический и технологический задел по созданию комплексов средств радиосвязи для различных авиационных носителей, в том числе беспилотных – БПЛА «Корсар», «Орион», «Альтиус», «Форпост-Р», «Охотник», «Орлан».

При этом до недавнего времени приёмопередающие средства и антенные системы проектировались исходя из того, что в качестве СКК используются радиосигналы с амплитудной или фазовой модуляцией по схеме с одной несущей, что отражается в определённых особенностях формирования диаграммы направленности (ДН) антенной системы по азимуту и углу места.

В настоящее время стали появляться радиомодемы для формирования и обработки COFDM радиосигналов (OFDM с канальным кодированием), которые обладают описанными выше преимуществами и позволяют передавать целевую информацию от разных целевых нагрузок (датчиков) с крайне высокими скоростями за счёт возможности использования нескольких несущих (множества поднесущих).

В табл. 1 представлены достигнутые отечественной промышленностью параметры модуляторов и демодуляторов сигналов COFDM.

### 1.1. Бортовые СВЧ приёмопередатчики радиосигналов COFDM

Известны отечественные бортовые СВЧ передатчики-конверторы радиосигналов COFDM диапазона 2,2-2,6 ГГц, имеющие ли-

терное исполнение, при входной промежуточной частоте  $810 \pm 7,5$  МГц, имеют выходные частоты:  $2200 \pm 7,5$  МГц;  $2350 \pm 7,5$  МГц;  $2550 \pm 7,5$  МГц.

Полоса выходных частот литерных передатчиков по уровню 3 дБ равна 15 МГц.

Максимальная выходная мощность бортовых передатчиков в режиме COFDM: 4 Вт при MER (коэффициент ошибок модуляции) не менее 14 дБ; 3 Вт при MER не менее 18 дБ.

Таблица 1

Общие параметры модуляторов и демодуляторов сигналов COFDM

Наименование параметра	Значение
Тип входных (модулятор) и выходных (демодулятор) интерфейсов	Ethernet (IP/UDP), MPEGoIP
Напряжение питания модулятора и демодулятора	27 В DC или 220 В AC
Скорость передачи данных, Мбит/с	от 3,6 до 48
Диапазон выходных частот модуляторов COFDM, МГц	470-860
Диапазон входных частот демодуляторов COFDM, МГц	470-860
Доплеровский сдвиг частоты на входе демодулятора, не более, кГц	20
Скорость изменения Доплеровского сдвига частоты на входе демодулятора, не более, кГц/с	0,2
Шаг перестройки частот сигналов COFDM, Гц	1
Режимы модуляции сигналов COFDM	В полном объеме режима А стандарта DVB-T2, а также стандарта DVB-T
Глубина временного перемежения данных	от 15 мс до 1000 мс
Диапазон изменения мощности сигнала COFDM на выходе модулятора, дБм	от минус 20 до нуля с шагом 0,1 дБ
Диапазон изменения мощности сигнала COFDM на входе демодулятора, дБм	от минус 50 до минус 20
MER на выходе модулятора, не менее, дБ	40
Пороговое значение $E_b/N_0$ на входе демодулятора (радиоканал Гаусса) при скоростях передачи данных от 3,6 до 48 Мбит/с (вероятность ошибки в выходном потоке демодулятора равна не более $10^{-9}$ ), дБ	В соответствии со спецификацией стандарта DVB-T2
Интерфейсы управления блоками модуляторов и демодуляторов	Ethernet, SNMP
Масса модулятора бортового исполнения, не более, кг	0,8

В рассматриваемой аппаратуре обеспечивается максимальный коэффициент передачи блоков, устанавливаемых на ЛПС, не менее 57 дБ (кроме режима сквозной ретрансляции).

В передающем тракте блоков, устанавливаемых на ЛПС (кроме режима сквозной ретрансляции), обеспечивается регулировка коэффициента передачи не менее 20 дБ с шагом 1 дБ.

Неравномерность коэффициента передачи в полосе  $\pm 7,5$  МГц составляет не более  $\pm 2$  дБ.

В режиме сквозной ретрансляции в передающем тракте блоков, устанавливаемых на ретрансляторе (РТР), предусмотрена автоматическая регулировка усиления (АРУ) глубиной не менее 20 дБ. Порог включения АРУ может изменяться.

В режиме сквозной ретрансляции обеспечивается коэффициент передачи блоков при выключенном АРУ не менее 65 дБ.

В состав блоков входят полосовые СВЧ фильтры, обеспечивающие уровень шумовых и сосредоточенных внеполосных составляющих передатчиков, измеренных в полосе 8 МГц, отстоящей от центральной частоты передатчика на более чем  $\pm 15$  МГц – менее минус 55 дБм.

В данной аппаратуре обеспечивается долговременная относительная нестабильность гетеродинов не более  $2 \times 10^{-7}$  и спектральная плотность фазовых шумов гетеродинов при отстройке от несущей:

на 100 Гц	не более минус 67 дБ;
на 1 кГц	не более минус 75 дБ;

на 10 кГц не более минус 85 дБ;  
на 100 кГц не более минус 95 дБ.

Масса бортового передатчика составляет не более 800 г, потребление от бортовой сети 27 В при выходной мощности в режиме COFDM 4 Вт – не более 22 Вт.

Интерфейс управления блоком передатчика-конвертора – Ethernet, SNMP.

Бортовые малошумящие приёмники-конверторы радиосигналов COFDM диапазона 2,2-2,6 ГГц разрабатывались для размещения на лёгких БПЛА и имеют литерное исполнение.

При входных частотах  $2200 \pm 7,5$  МГц,  $2350 \pm 7,5$  МГц,  $2550 \pm 7,5$  МГц выходная промежуточная частота равна  $810 \pm 7,5$  МГц.

Коэффициент шума, измеренный по входу СВЧ, составляет не более 3 дБ.

Уровень интермодуляционных составляющих, измеренный двухсигнальным методом, при суммарной выходной мощности двух сигналов равен минус 15 дБм (входная мощность при включенной АРУ – минус 60 дБм) составляет не более минус 20 дБ.

Коэффициент передачи, измеренный при выключенном АРУ (до порога срабатывания АРУ) и входном сигнале в диапазоне от минус 100 до минус 80 дБм, равен не менее 65 дБ.

Неравномерность коэффициента передачи в полосе  $\pm 4$  МГц от центральной частоты – не более  $\pm 1$  дБ.

Уровень подавления внеполосных сигналов при отстройке от центральной частоты:

$\pm 40$  МГц – не менее 65 дБ;  
 $\pm 180$  МГц – не менее 75 дБ.

Спектральная плотность фазовых шумов гетеродинов при отстройке от несущей:

на 100 Гц не более минус 67 дБ;  
на 1 кГц не более минус 75 дБ;  
на 10 кГц не более минус 85 дБ;  
на 100 кГц не более минус 95 дБ.

Масса бортового приёмника-конвертора составляет не более 800 г, потребление от бортовой сети 27 В – не более 15 Вт.

Интерфейс управления блоком приёмника-конвертора – Ethernet, SNMP.

Разработанные к настоящему времени СВЧ приёмопередатчики радиосигналов COFDM для радиорелейных линий связи диапазонов 3,6-4,2 МГц и 5,9-6,4 МГц имеют диапазоны перестройки 500 МГц с шагом 1 МГц (гетеродины трактов передачи и трактов приёма различные).

Максимальная мощность существующих передатчиков диапазонов 3,6-4,2 МГц и 5,9-6,4 МГц составляет 2 Вт (при MER не менее 35 дБ).

Коэффициент шума не превышает 4 дБ.

Глубина АРУ приёмников – не менее 60 дБ.

Параметры стабильности частоты и фазовых шумов соответствуют приведённым выше для литерных блоков.

Бортовые СВЧ передатчики-конверторы радиосигналов COFDM диапазона 5,9-6,4 ГГц разрабатывались для размещения на высотных антенно-мачтовых сооружениях (АМС) систем телерадиовещания.

В приёмопередатчиках обеспечиваются мощность передачи в режиме COFDM 2 Вт, коэффициент шума не более 3,5 дБ, перестройка частот в полосе 500 МГц с шагом 1 МГц и уникальные параметры фазовых шумов и линейности на лёгких БПЛА, имеют литерное исполнение.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствуют известные аналоги, обеспечивающие приведённые параметры спектральной плотности мощности фазовых шумов, подавления внеполосных сигналов и параметры линейности приёмных и передающих трактов.

Внешний вид приёмопередатчика диапазона 6 ГГц представлен на рис. 1.



Рис. 1. СВЧ приёмопередатчик диапазона 5925-6425 МГц с мощностью в режиме COFDM 2 Вт

## 1.2. Бортовые коллинеарные антенны для диапазонов частот от 800 до 6400 МГц

Основные характеристики разработанных бортовых коллинеарных антенн для диапазонов частот от 800 МГц до 6400 МГц представлены в табл. 2.



Таблица 2

Характеристики бортовых коллинеарных антенн

Диапазон частот	1700-1900 МГц	2300-2500 МГц	5900-6400 МГц
Максимальный коэффициент усиления (КУ), дБи	8	9	11
КУ при угле места 0 град. при размещении на ЛПС, дБи	8	9	11
Коэффициент стоячей волны (КСВ), не более, ед.	1,5	1,5	1,5
Размеры, мм	38×38×495	38×38×480	38×38×420

Оценки параметров деформации ДН корпусом ЛПС проведены при размещении антенн на технологическом люке фюзеляжа самолета «ИЛ-114 ЛЛ» без учёта дополнительных потерь при размещении антенн под штатным радиопрозрачным обтекателем (РПО) бортовой радиолокационной системы (БРЛС).

На рис. 2 приведён внешний вид бортового модулятора сигналов COFDM, бортового СВЧ передатчика с мощностью в режиме COFDM 4 Вт и бортовой антенны, ненаправленной в азимутальной плоскости с КУ 6,5 дБи (диапазон 2550 МГц).

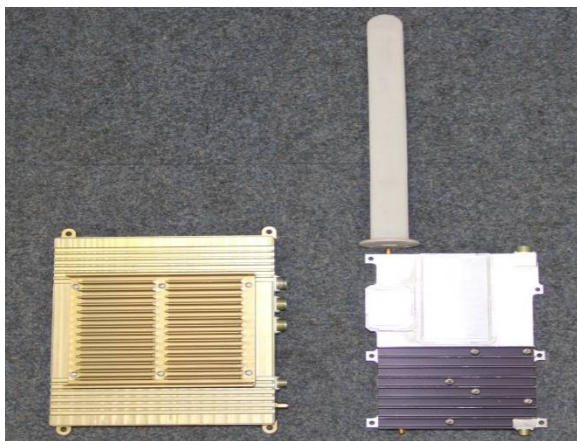


Рис. 2. Бортовой модулятор сигналов COFDM, бортовой СВЧ передатчик с мощностью в режиме COFDM 4 Вт и бортовая антенна

На рис. 3 приведён внешний вид бортового малошумящего приёмника и передатчика, осуществляющих ретрансляцию сигналов COFDM по промежуточной частоте.

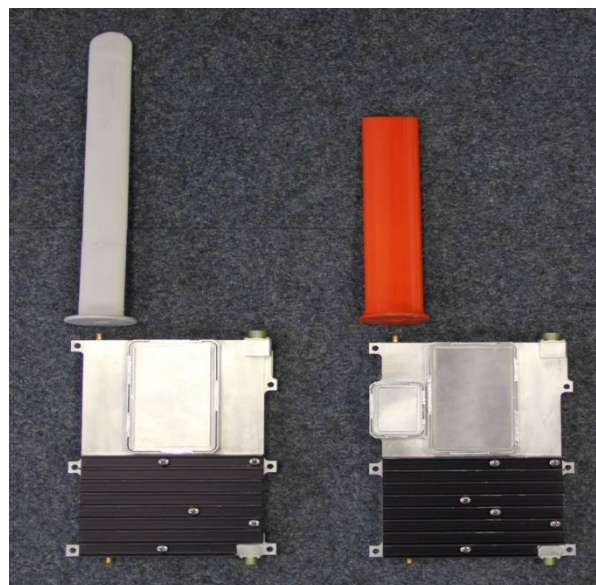


Рис. 3. Бортовой ретранслятор сигналов COFDM (ретрансляция по промежуточной частоте)

Комплект аппаратуры ретранслятора конструктивно может поместиться на лёгком БПЛА «Орлан-10» в центроплане аппарата.

Антенны устанавливаются в верхней части центроплана на удалении 700 мм друг от друга.

Максимальный КУ ретранслятора (от выхода приёмной до входа передающей антенны) равен 130 дБ, обеспечивается автоматическая регулировка усиления (АРУ) глубиной до 60 дБ и фильтровая развязка трактов передачи и приёма не менее 120 дБ.

На рис. 4 и рис. 5 приведён внешний вид БПЛА «Орлан-10» с аппаратурой ретрансляции сигналов COFDM.



Рис. 4. Аппаратура ретрансляции, размещённая в центроплане БПЛА «Орлан-10»



Рис. 5. Размещение приёмной и передающей антенн на крыльях БпЛА «Орлан-10»

Внешний вид бортового комплекта аппаратуры ретрансляции сигналов COFDM с обработкой информации с пассивной системой климатической защиты, использующей тепловые трубы с переменной теплопроводностью, для размещения на самолётах и БпЛА с полезной нагрузкой более 10 кг, приведён на рис. 6.

В приведённом конструктиве обеспечивается размещение различных комбинаций блоков СВЧ и аппаратуры каналообразования:

- СВЧ передатчик, СВЧ приёмник, один модулятор COFDM, один демодулятор COFDM (ретранслятор одной несущей COFDM с обработкой радиосигналов на борту);
- или два СВЧ передатчика, два модулятора COFDM (двухдиапазонный бортовой передатчик двух несущих COFDM);
- или СВЧ передатчик, модулятор COFDM и аппаратура высокоскоростного радиоканала БпЛА «Орлан-10» с модуляцией QAM, радиоканал управления с модуляцией псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

Совместное размещение аппаратуры с модуляцией QAM и COFDM использовано для получения адекватных сравнительных оценок параметров радиолиний с различными методами модуляции и кодирования в ходе лётных испытаний.



Рис. 6. Внешний вид бортового комплекта аппаратуры ретрансляции сигналов COFDM и QAM с обработкой информации

### 1.3. Аппаратура комплексов наземных пунктов управления и обработки информации

В составе аппаратурных комплексов НПУОИ в настоящее время могут использоваться:

- приёмная антенная система с зеркалом диаметром около 1,5 м диапазона 2200-2700 МГц с системой автоматического наведения на самолёт или БпЛА;
- приёмный малошумящий усилитель-конвертор диапазона 2200 МГц или 2350 МГц;
- демодуляторы видеоданных COFDM;
- блок приёма, демодуляции и декодирования высокоскоростных данных с модуляцией QAM;
- программный декодер видеоданных, осуществляющий формирование не компрессированных видеоданных;
- аппаратура радиоканала управления аппаратурой радиолинии;
- автоматизированное рабочее место оператора управления БпЛА;
- автоматизированное рабочее место оператора управления аппаратурой радиолинии.

Внешний вид приёмного малошумящего усилителя-конвертора и демодулятора видеоданных COFDM (2 демодулятора в одном корпусе стоечного исполнения) приведён на рис. 7.

Аппаратура НПУОИ может размещаться как в составе стационарных объектов, так и в составе мобильных объектов на базе автомобиля «КАМАЗ-5350» с кузовом-фургоном К.5350, или транспортируемых объектов (контейнеров).

На рис. 8 приведён внешний вид варианта НПУОИ на базе автомобиля «КАМАЗ-5350» с кузовом-фургоном К.5350, с антенной диаметром 1,5 м, установленной на выносном опорно-поворотном устройстве (ОПУ), размещённом на крыше кузова, с расчётным КУ 28 дБи.



Рис. 7. Наземный демодулятор сигналов COFDM и малошумящий усилитель-конвертор



Рис. 8. Вариант НПУОИ на базе автомобиля «КАМАЗ-5350» с кузовом-фургоном К.5350 с антенной диаметром 1,5 м, установленной на крыше фургона

#### 1.4. Антенные посты с системами наведения на ЛПС с антеннами диаметром от 0,9 м до 1,5 м диапазонов 2,2-2,7 ГГц и 5,9-6,4 ГГц

В радиолиниях с ЛПС, как вариант, могут использоваться антенные системы диапазона 2,2-2,7 ГГц с облегченными антеннами сетчатого типа диаметром 0,9 м (работа на дальности

до 150 км) и 1,5 м (работа на дальностях до 310 км).

Антенна диаметром 0,9 м вместе с ОПУ может размещаться на телескопической мачте высотой до 10 м, что в ряде случаев облегчает требования по обеспечению радиовидимости БПЛА.

Антенна диаметром 1,5 м вместе с ОПУ размещается на выносной треноге. Обеспечивается возможность выноса антенного поста с аппаратурой на расстояние до 70 м от НПУ.

Основные характеристики блока ОПУ для антенны диаметром 1,5 м приведены в табл. 3.

#### 1.5. Пассивные системы климатической защиты аппаратуры наземного и бортового исполнения

Комплекты аппаратуры с модуляцией COFDM (кроме передающей антенны) размещаются в защищённых отсеках с пассивной системой тепловой защиты на основе тепловых труб с переменной теплопроводностью.

Таблица 3

Технические характеристики блока ОПУ для антенны диаметром 1,5 м

Характеристика	Значение
Угол поворота, град.: - по азимуту, град.; - по углу места, град.	без ограничения от минус 5 до плюс 90
Скорость поворота, град/сек.: - по углу места (регулируется); - по азимуту (регулируется)	1; 15 1; 20
Ошибка позиционирования, в экстремальном режиме, не более, град.	$\pm 0,5$
Режимы наведения	программный, экстремальный, комбинированный, ручной
Тип интерфейса управления	RS-485 / RS-422
Напряжение питания постоянного тока, В	$24 \pm 10\%$
Потребляемая мощность, не более, Вт	65
Рабочая температура эксплуатации, °C - стандартного исполнения; - «северного» исполнения. Температура хранения, °C	от минус 35 до плюс 50 от минус 50 до плюс 50 от минус 55 до плюс 70
Габаритные размеры: длина, ширина, высота, мм	1600×600×400
Масса, не более, кг	28

Работоспособность аппаратуры в заданных условиях эксплуатации обеспечивается без дополнительного электропотребления для подогрева аппаратуры при пониженных тем-

пературах и охлаждения аппаратуры при повышенных температурах окружающей среды.

Разработанный конструктив позволяет в зависимости от места установки аппаратуры использовать в качестве внешнего радиатора



элементы конструкции объекта установки (топливный бак, фюзеляж и т.п.).

При отсутствии такой возможности используются входящие в состав защищённого конструктива внешние радиаторы (штыревые, ребристые) различных вариантов исполнения (металлические или пластмассовые из термопласта). Параметры радиаторов для конкретного варианта конструкции определяются таким образом, чтобы при температуре окружающей среды 50°C на радиаторах установленного внутри отсека оборудования температура не превышала 65°C, а при температуре окружающей среды минус 60°C на радиаторах установленного оборудования температура была не менее плюс 5°C.

### 1.6. Аппаратно-программный комплекс управления радиопередачами с сигналами COFDM

Комплекс обеспечивает полный мониторинг состояния сети связи из нескольких пространственно-разнесённых объектов связи в целом, отдельных радиопередач и аппаратуры локальных узлов.

Управление элементами сети может осуществляться как от центрального сервера, так и от блоков контроля и управления локальных узлов (терминалов ИРЛ) при наличии у них соответствующих полномочий.

Такая возможность обеспечивается посредством передачи одной формализованной команды автоматизированной и автоматической прошивки заданных режимов работы всего комплекса аппаратуры любого локального узла (несколько сотен параметров для аппаратуры с сигналами COFDM).

Данные о состоянии сети формируются при опросе с заданной периодичностью (2-4 секунды для сети из 5 локальных узлов), «матриц состояния оборудования» каждого из локальных узлов и вектора тех параметров, значения которых вышли из заданных границ.

В состав комплекса входит центральный сервер, АРМ НПУОИ и совокупность блоков контроля и управления локальных узлов (БЛА, других пунктов управления).

Центральный сервер и блоки контроля и управления наземных локальных узлов представляют собой портативные ПК с предустановленным ПО.

На ЛПС при пропускной способности радиоканала управления до 16 кбит/с в качестве блоков контроля и управления используются

блоки, обеспечивающие упрощённую фильтрацию данных узла и сопряжение с низкоскоростным радиоканалом управления.

При наличии радиоканала управления со скоростью передачи информации более 64 кбит/с блоки управления на ЛПС могут не устанавливаться, и эти объекты управляются непосредственно центральным сервером.

## 2. Результаты лётных испытаний передачи целевой информации по радиопередаче с модуляцией радиосигнала QAM и OFDM

Лётные испытания проводились в реальных климатических условиях в районе Ладожского озера в период с мая по октябрь 2018 г.

Испытания проводились как с использованием лёгких БЛА типа «Орлан-10» (рис. 9), так и с использованием самолёта-лаборатории «Ил-114ЛЛ» (рис. 10) на базе лётно-испытательного комплекса (ЛИК) АО «НПП «Радар ММС» (г. Санкт-Петербург).

Трассы полётов при проведении испытаний как с лёгкими БЛА, так и с самолётом «ИЛ-114ЛЛ» отличались только высотными коридорами (до 4,3 км и до 6,4 км соответственно) и длиной трасс (250 км и 310 км соответственно). Схема проведения лётных испытаний приведена на рис. 11. На рис. 12 представлен малогабаритный приёмный терминал диапазона 2 ГГц.



Рис. 9. Аппаратурные комплексы, использованные при испытаниях с лёгким БЛА «Орлан-10»



Рис. 10. Летающая лаборатория «Ил-114ЛЛ» с установленными объектами испытаний

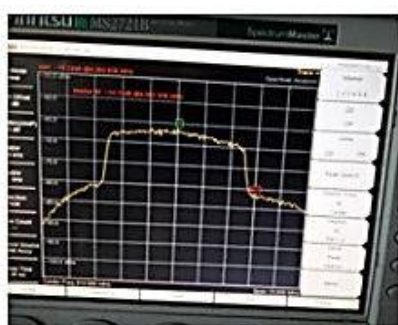
На рис. 13 приведены типовые спектрограммы сигналов COFDM для периодов отсутствия замираний (при максимальных отношениях сигнал/шум, слева), наличия плоских интерференционных замираний (посередине), а также частотно-селективных интерференционных замираний (справа), обусловленных Доплеровским рассеянием.



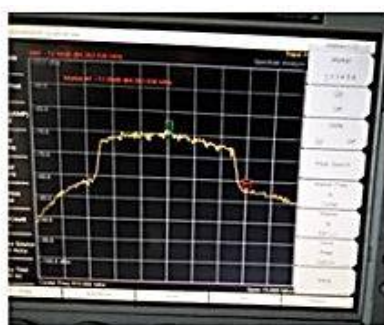
Рис. 11. Схема проведения лётных испытаний



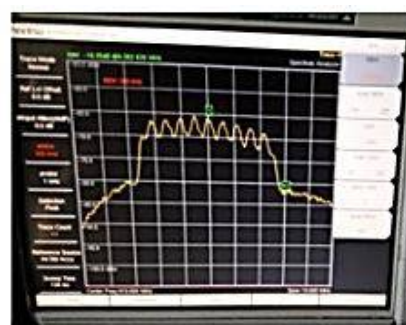
Рис. 12. Малогабаритный приёмный терминал диапазона 2 ГГц, содержащий плоскую ФАР с КУ 15 дБи и две коллинарные антенны, ненаправленные в азимутальной плоскости, с КУ 5 дБи



Спектрограмма сигнала при  
отсутствии  
интерференционных  
замираний



Спектрограмма сигнала при  
плоских  
интерференционных  
замираниях, обусловленных  
Доплеровским рассеянием



Спектрограмма сигнала при  
частотно селективных  
интерференционных  
замираниях, обусловленных  
Доплеровским рассеянием

Рис. 13. Типовые спектрограммы сигналов COFDM

Новой задачей, решение которой обеспечивалось в ходе испытаний, являлась задача измерения параметров достоверности и коэффициентов готовности (КГ) радиолиний.

При классическом определении КГ – относительное время работы радиолинии, в течение которого вероятность битовых ошибок не превышает некоторую заданную величину  $P_{\text{ош макс}}$ .

Для передачи компрессированных видеоданных в форматах JPEG максимальное значе-

ние вероятности ошибки на бит на выходе радиоканала (входе декодера JPEG) в известных нормативных документах не определено.

Если принять, что допустимой является одна битовая ошибка в декомпрессированном кадре изображения (искажается один «пиксель») стандартного качества, а также считать, что коэффициент размножения ошибок в декодере JPEG равен коэффициенту компрессии, можно получить, что при коэффициентах компрессии от 8 до 16 максимальное значение ве-

роятности ошибки  $P_{\text{ош макс}}$  на выходе радиоканала (входе декодера JPEG) должно быть не более  $5 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-7}$ .

Время анализа вероятности битовых ошибок на выходе радиоканала связи (входе декодера JPEG) с погрешностью 10-15 процентов должно удовлетворять неравенству [16]

$$T(c) \geq (85 - 100) \cdot \frac{1}{C(\text{бит/с}) \times P_{\text{ош}}}.$$

При заданной  $P_{\text{ош}} \leq 10^{-7}$  и скорости передачи компрессированных данных 10 Мбит/с интервал анализа вероятности битовых ошибок на входе декодера JPEG должен составлять 85-100 с.

Такое время анализа соизмеримо с предполагаемой длительностью сеанса передачи данных о наблюдаемых объектах, и очевидно, что оно неприемлемо для оценки устойчивости радиолинии.

Кроме того, оценки с приведёнными параметрами усреднения не смогут учесть параметры распространения, имеющие интервалы корреляции, существенно меньшие, чем интервалы времени, необходимые для оценки состояния радиоканала.

Для устранения указанного противоречия при испытаниях использовались две взаимодополняющие системы оценки коэффициента готовности радиоканала:

1) Система оценки КГ на основе измерений отношения сигнал/шум на входе демодуляторов сигналов и параметров системы синхронизации радиоканала с использованием программы контроля и управления аппаратурой «Радиосеть ЛПС».

Цикл опроса аппаратуры, расположенной на ЛПС и НПУОИ, составлял от 1 до 4 секунд.

Таким образом, данные о состоянии радиоканала, в том числе текущее значение отношения сигнал/шум, MER, напряжение АРУ приёмников, параметры временной и частотной синхронизации в радиоканалах, с периодом 1-4 с формировали соответствующие базы данных на ЛПС и НПУОИ.

Погрешность измерения отношения сигнал/шум встроенными контроллерами демодуляторов сигналов составляет не более 2 дБ.

Так как для радиоканала с многолучевым распространением данные об отношении сигнал/шум недостаточны для оценки его состояния, одновременно с данными об измеренных отношениях сигнал/шум программа формирует данные о вероятностях битовой ошибки на входе и выходе системы декодирования, бло-

ковых ошибках и аварийных сигналах временной и частотной синхронизации.

Из совокупности массивов данных о состоянии радиоканала на каждом интервале оценки длительностью 1-4 с формируется индикатор перерыва связи.

Для формирования индикатора перерыва связи используется мультипликативная свёртка событий, состоящих в выходе измеренных параметров из области допустимых значений.

Для задания граничных значений отношения сигнал/шум для каждого из используемых методов модуляции и помехоустойчивого кодирования используются расчётные значения, соответствующие заданной  $P_{\text{ош макс}}$  на выходе радиоканала (входе декодера JPEG), а также измеренные в ходе стендовых испытаний для радиоканала Гаусса и радиоканала с имитацией многолучевого распространения значения энергетических потерь, связанных с аппаратной реализацией радиоканала и Доплеровским рассеянием.

2) Система оценки КГ на основе оценки параметров передаваемых и принимаемых кадров изображения с использованием программы «SelNet».

Программа «SelNet», установленная на НПУОИ, обеспечивает помимо декомпрессии видеоданных оценку битовых и семантических ошибок в компрессированных потоках с формированием соответствующих баз данных.

Оценка проводится для каждого кадра изображения и, таким образом, интервал оценок оказывается существенно (в 50-200 раз) меньше, чем при использовании программы контроля и управления аппаратурой радиоканала ЛПС «Радиосеть ЛПС».

В зависимости от заданного уровня компрессии и параметров раstra не компрессированного изображения на передающем конце кодер JPEG формирует соответствующее число пакетов (фрагментов) для каждого кадра изображения.

Общий размер компрессированного кадра, количество сформированных фрагментов, временная метка кадра и контрольная сумма каждого фрагмента сообщаются приёмнику в служебных данных пакетов.

При наличии синхронизации в радиоканале (синхронизации декодера) приёмник для каждого кадра фиксирует временную метку и общее количество фрагментов, принятых с ошибками и без ошибок.

При нарушении связи по радиолинии (отсутствии синхронизации декодера) запись в



базу прерывается до момента установления синхронизации.

Таким образом, система «SelNet» позволяет оценить вероятность пакетных и битовых ошибок в радиоканале (в периоды времени, для которых обеспечивается синхронизация декодера) и КГ радиоканала за любой заданный промежуток времени как отношение количества принятых кадров к количеству переданных кадров (определяется как произведение длительности сеанса радиосвязи на среднюю скорость передачи кадров).

Погрешность такой оценки определяется длительностью сеанса связи и нестабильностью системы кадровой синхронизации видеоданных.

При длительности сеанса более одной минуты дисперсия оценки скорости передачи кадров составляет менее 0,1% и, соответственно, погрешности оценки коэффициента готовности с использованием системы «SelNet» становятся пренебрежимо малыми.

Таким образом, в ходе лётных испытаний при оценках коэффициента готовности система «SelNet» рассматривалась как эталонная для программы контроля и управления аппаратурой радиоканала ЛПС «Радиосеть ЛПС».

Вместе с тем, при оценках достоверности передачи за тот или иной промежуток времени, программа контроля и управления аппаратурой «Радиосеть ЛПС» рассматривалась как эталонная для системы «SelNet».

Основные результаты лётных испытаний аппаратуры передачи высокоскоростных данных для ЛПС с модуляцией одной несущей частоты QAM и модуляцией COFDM приведены в табл. 4 и табл. 5.

Результаты испытаний радиолинии с ретрансляцией приведены в табл. 4, для модуляции QAM получены для варианта, при которых в полёте находилось одновременно два БПЛА «Орлан-10», один из которых (БПЛА ОЭМ) являлся источником видеоданных (ЛПС – содержит оптико-электронную систему, аппаратуру компрессии и аппаратуру передачи видеоданных), а второй содержит аппаратуру ретрансляции (РТР).

Ретранслятор находился в зоне барражирования на удалении 190-210 км от НПУОИ (по трассе рис. 11), а БПЛА-ОЭМ двигался по заданному маршруту с удалением от НПУОИ до 250 км.

При испытаниях радиолиний с модуляцией COFDM в связи с массогабаритными ограничениями полезной нагрузки БПЛА «Орлан-10» (не более 2 кг) разместить на нём одновременно оптико-электронную систему, аппаратуру компрессии и аппаратуру передачи видеоданных с модуляцией COFDM не представилось возможным (суммарная масса только модулятора COFDM и передатчика составляет около 2 кг, что исключает возможность установки оптико-электронной системы и аппаратуры компрессии).

Кроме того, для дальностей радиоканалов более 200 км БПЛА «Орлан-10» имеет недостаточную длительность и высоту полёта, а расчётные (подлежащие проверке) дальности радиоканалов с сигналами COFDM составляли при имеющихся энергетических параметрах аппаратуры около 250 км.

В силу указанных причин для модуляции COFDM в ходе испытаний использовался наземный имитатор ЛПС.

Имитатор представлял собой штатный передатчик сигналов (модулятор COFDM, передатчик и антенна, см. рис. 8), расположенный на кузове НПУОИ.

Приведённый в таблицах КГ равен отношению числа кадров, принятых без ошибок, к общему числу переданных кадров за время полёта.

КУ бортовых приёмных и передающих антенн приведён с учётом потерь в РПО и деформации ДН корпусом ЛПС.

Мощность передатчика в режиме COFDM приводится для заданных уровней нелинейных искажений (MER) и составляет для разработанных передатчиков 25-30 % от мощности насыщения.

Мощность передатчиков для QAM-4 соответствует 1 дБ компрессии КУ (для разработанных передатчиков 75-80 % мощности насыщения).

Таблица 4

Результаты лётных испытаний аппаратуры передачи высокоскоростного потока данных с модуляцией QAM и COFDM в радиолиниях с ретрансляцией на ЛПС

Радиолиния с ретрансляцией ЛПС-РТР-НПУОИ		
Тип передаваемых данных целевых нагрузок	ИК и видео с компрессией JPEG Уровень компрессии от 4 до 32	
Наименование параметра	Модуляция QAM	Модуляция COFDM
Дальность радиолинии с ретрансляцией, км	250	520
Максимальная высота ЛПС (для модуляции COFDM – наземный имитатор) на конечном участке трассы, м	200	5
Максимальная высота РТР на конечном участке трассы, м	2800	5800
Средняя скорость полёта ЛПС, км/ч	60	0
Средняя скорость полёта РТР, км/ч	110	410
Интервал ЛПС-РТР		
Максимальная дальность радиолинии ЛПС-РТР, км	50	260
Диапазон частот, ГГц	2,35	0,81
КУ бортовых приёмных и передающих антенн, не более, дБи	5,5	3,1
Мощность бортового передатчика, Вт	5,0	4,0
Скорость передачи информации на участке ЛПС-РТР, Мбит/с	5,0	5,9
Метод модуляции и кодирования на участке ЛПС-РТР	QPSK 1/2 (турбо-код)	QPSK 1/2
Пороговое отношение сигнал/шум в радиоканале с АБГШ, дБ	3,0	1,0
Средний энергетический запас на участке ЛПС-РТР от $0,8 \cdot R_{\text{макс}}$ до $R_{\text{макс}}$ , дБ	17,54	1,63
Спектральная эффективность передачи информации, бит/с/Гц	1	1
КГ на участке ЛПС-РТР от $0,8 \cdot R_{\text{макс}}$ до $R_{\text{макс}}$ , дБ, измер./расчѐтн.	0,9/0,64	0,92/0,83
Средняя вероятность битовых ошибок информации в период готовности, не более	$10^{-6}$	$10^{-8}$
Интервал РТР-НПУОИ		
Максимальная дальность радиолинии РТР-НПУОИ, км	200	260
Диапазон частот, ГГц	2,55	2,55
КУ бортовых передающих антенн, не более, дБи	5,5	5,5
Мощность бортового передатчика, Вт	5,0	3,2
Диаметр антенны наземного пункта приёма, м	1,5	1,5
Скорость передачи на участке РТР-НПУОИ	10	12,151
Метод модуляции и кодирования на участке РТР-НПУОИ	QPSK 1/2 (турбо-код)	QAM-16 1/2
Пороговое отношение сигнал/шум в радиоканале с АБГШ, дБ	3,0	6,0
Средний энергетический запас на участке РТР-НПУОИ от $0,8 \cdot R_{\text{макс}}$ до $R_{\text{макс}}$ , дБ	16,24	10,83
Спектральная эффективность передачи информации, бит/с/Гц	1	1
КГ на участке РТР-НПУОИ от $0,8 \cdot R_{\text{макс}}$ до $R_{\text{макс}}$ , дБ, измер./расчѐтн.	0,94/0,993	0,995/0,991
Средняя вероятность ошибок на бит информации в период готовности, не более	$10^{-6}$	$10^{-8}$

Таблица 5

Результаты лётных испытаний аппаратуры передачи высокоскоростных данных с модуляцией QAM и COFDM в радиолиниях без ретрансляции ЛПС-НПУОИ

Радиолиния без ретрансляции ЛПС-НПУОИ		
Тип передаваемых данных целевых нагрузок	ИК и видео с компрессией JPEG-2000 Уровень компрессии от 4 до 32	
Наименование параметра	Модуляция QAM	Модуляция COFDM
Высота ЛПС на конечном участке трассы, м	5900	6400
Средняя скорость полёта ЛПС, км/ч	400-500	400-500
Дальность связи, км	260	310 (ограничена высотой полёта)
Диапазон частот, ГГц	2,55	2,55
КУ бортовых передающих антенн, дБи	5,5	5,5
Мощность бортового передатчика, Вт	5	2,8
Диаметр антенны наземного пункта приёма, м	1,5	1,5
Скорость передачи, Мбит/с	10	26,9



Продолжение табл. 5

Метод модуляции и кодирования	QPSK 1/2 (турбокод)	QAM-256 1/2
Пороговое отношение сигнал/шум в радиоканале с АБГПШ, дБ	3	13,2
<b>Средний энергетический запас на участке ЛПС-НПУОИ от <math>0,8 \cdot R_{\text{макс}}</math> до <math>R_{\text{макс}}</math>, не более, дБ</b>	<b>14,5</b>	<b>4,07</b>
Спектральная эффективность передачи информации, бит/с/Гц	1	3,45
<b>КГ на участке ЛПС-НПУОИ от <math>0,8 \cdot R_{\text{макс}}</math> до <math>R_{\text{макс}}</math>, измер./расчётн.</b>	<b>0,92/0,908</b>	<b>0,905/0,79</b>
Средняя вероятность ошибок на бит информации в период готовности, не более	$10^{-6}$	$10^{-8}$

Таким образом, при идентичных энергетических параметрах радиолинии с модуляцией COFDM и радиолинии с модуляцией QAM (мощности передатчиков и параметры антенн одинаковы) на одной и той же трассе над водной поверхностью и близких погодных условиях получены следующие результаты сравнительного анализа радиолиний с модуляцией QAM и модуляцией COFDM:

- в радиолинии ЛПС-ЛПС (РТР) максимальная длина «плеча ретрансляции» для КГ, близкого к 0,9, с модуляцией QAM (QPSK 1/2, турбокод) составила 50 км, а в радиолинии с модуляцией COFDM (модуляция поднесущих QPSK 1/2) – 260 км. При этом средний энергетический запас на участке ЛПС-РТР от  $0,8 R_{\text{макс}}$  до  $R_{\text{макс}}$  для модуляции COFDM приблизительно на 15 дБ меньше, чем для модуляции QAM;

- в радиолиниях ЛПС-НПУОИ максимальная длина радиоканала со скоростью передачи информации 10 Мбит/с с модуляцией QAM (QPSK 1/2, турбокод) для КГ, близкого к 0,9, и средним энергетическим запасом от  $0,8 \cdot R_{\text{макс}}$  до  $R_{\text{макс}}$  около 14 дБ, составила 260 км. Дальность радиосвязи ограничивается энергетическим потенциалом радиолинии;

- в радиолиниях без ретрансляции ЛПС-НПУОИ максимальная длина радиоканала со скоростью передачи 26,9 Мбит/с с модуляцией COFDM (QAM-256, 1/2) для КГ, близкого к 0,9, и средним энергетическим запасом от  $0,8 R_{\text{макс}}$  до  $R_{\text{макс}}$  около 4 дБ (на 10 дБ меньше, чем с модуляцией QAM), составила 310 км.

Дальность радиосвязи ограничивается недостаточной высотой полёта (выделенный коридор при испытаниях – до 6,4 км) и рефракционными замираниями, связанными с затенением трассы распространения радиосигнала.

### Заключение

В данной статье представлены основные достигнутые характеристики радиотехнической

аппаратуры, базирующейся на формировании и обработке радиосигналов типа OFDM, которые, как показано в работе [8], имеют ряд неоспоримых преимуществ перед радиосигналами типа QAM и PSK с различной позиционностью и скоростями кодирования. OFDM является робастной схемой модуляции, обеспечивающей эффективную эквализацию сигнала в многолучевых частотно-селективных каналах связи. Технология модуляции сигналов OFDM применена в большинстве современных беспроводных систем связи, включая беспроводные сети Wi-Fi, системы беспроводного широкополосного доступа WiMAX, системы цифрового телевидения DVB-T, систему связи четвертого поколения LTE и др.

К основным недостаткам OFDM радиосигнала, которые необходимо учитывать разработчикам и эксплуатантам радиоэлектронных средств (РЭС), можно отнести: высокий пик-фактор радиосигнала, большой Доплеровский сдвиг частоты, строгие требования к синхронизации времени и частоты радиосигнала.

Лётные испытания показали, что использование радиосигналов OFDM позволяет получить увеличенные дальности радиосвязи, бороться с многолучевостью, обеспечить работу при меньших энергетических запасах и многократно повысить пропускные способности за счёт наращивания количества поднесущих.

### Литература

1. Полинкин А.В., Ле Х.Т. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-2. С. 98-107.
2. Киселев С.В., Попов А.С., Федюшкин А.В. Организация беспроводной широкополосной связи // Научный резерв. 2020. №2(10). С. 32-37.
3. Научно-технический задел создания системы информационного обмена и управления группой беспилотных летательных аппаратов на основе реконфигурируемой полносвязной радиосети кластерного типа/ Л.Н. Казаков, А.Б. Герасимов, Е.А. Селянская, А.Б. Царев // Роботизация Вооруженных Сил РФ: сб. ст. V военно-науч. конф. Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА», 2020. С. 60-70.

4. Климов В.С., Лопота А.В., Спасский Б.А. Тенденции развития наземных робототехнических систем военного назначения // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. №3(8). С. 3-10.
5. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО//Электроника: наука, технологии, бизнес. 2010. № 3. С. 80–86.
6. Слюсар В. Радиолинии связи с БПЛА. Пример реализации // Электроника: наука, технологии, бизнес. 2010. № 5(103). С. 56-61.
7. Илюшко В.М., Нарытник Т.М. Система передачи данных на базе высотного беспилотного летательного аппарата (СПД "Фазтон")//Зв'язок. 2004. № 7. С. 38–39.
8. Техническая реализация высокоскоростного информационного канала радиосвязи с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления/ Д.Г. Пантенков, Н.В. Гусаков, А.Т. Егоров, А.А. Ломакин, В.П. Литвиненко, В.И. Великоиваненко, Е.Ю. Лю-Кэ-Сю // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т.15. №5. С.52-71.
9. Пантенков Д.Г. Технические аспекты создания радиотехнических систем информационно-командного сопряжения для комплексов с беспилотными летательными аппаратами // Антенны. 2021. №1(269). С. 11–29.
10. Система межвидовой связи на беспилотном летательном аппарате / Ю.В. Невзоров, Е.А. Володин, А.С. Кореньков, И.А. Фомина // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. № 1-2. С. 47-49.
11. Цветков К.Ю., Акмоллов А.Ф., Викторов Е.А. Модель канала управления передачей смешанного трафика речи и данных в разнорысотной системе спутниковой связи // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 63–70.
12. Опыт применения имитационного моделирования боевых действий на базе технологий виртуальной реальности для оценки наземных робототехнических комплексов военного назначения/ И.В. Благодарщев, Е.А. Антохин, А.М. Федюлин, В.А. Паничев // Робототехника и техническая кибернетика. 2019. Т. 7. № 2. С. 94-99.
13. Пат. на полезную модель 191 165, Российская Федерация, МПК H04 B 7/02 (2006.01). Бортовой терминал радиосвязи беспилотного летательного аппарата / Долженков Н.Н., Абрамов А.В., Егоров А.Т., Ломакин А.А., Пантенков Д.Г.; заявитель и патентообладатель АО «Кронштадт». 26.07.2019, Бюл. №21.
14. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Техническая реализация критических узлов и устройств приема широкополосных радиосигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 3. С. 34-45.
15. Система информационного обмена и обнаружения объектов в условиях сложного рельефа местности / В.К. Цветков, К.С. Лялин, А.И. Синани, А.Л. Переверзев, В.И. Орешкин // Наноиндустрия. 2020. № S5-1(102). С. 117-125.
16. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн. Кн. 1: Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА: монография. М.: Радиотехника, 2016. 507 с.
17. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн. Кн. 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА: монография. М.: Радиотехника, 2016. 821 с.
18. Иванкин Е.Ф. Информационные системы с апостериорной обработкой результатов измерений: монография / под ред. А.Г. Остапенко. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 168 с.
19. Особенности построения радиоканала с беспилотным летательным аппаратом/ Д.А. Кузнецов, П.О. Митрошина, А.К. Сагдеев, А.А. Сёмин // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 2. С. 82-88.
20. Чиров Д.С., Лобов Е.М. Выбор сигнально-кодовой конструкции для командно-телеметрической линии радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами средней и большой дальности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 10. С. 21-28.
21. Макаренко С.И. Робототехнические комплексы военного назначения - современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10204.
22. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1: Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
23. Макаренко С.И., Тимошенко А.В. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 2: Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 147-197. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106.
24. Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 3: Радиоэлектронное подавление систем навигации и радиосвязи // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 101-175. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10205.
25. Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 4: Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 122-157. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304.
26. Бомштейн К.Г., Полянский В.В. Борьба с беспилотными летательными аппаратами противника // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2014. № 2. С. 49-60.
27. Семенец В.О., Трухин М.П. Способы противодействия беспилотным летательным аппаратам // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 4-12.

Поступила 03.03.2022; принята к публикации 19.04.2022

#### Информация об авторах

**Пантенков Дмитрий Геннадьевич** – канд. техн. наук, заместитель главного конструктора по радиосвязи, АО «Кронштадт» (123060, Россия, г. Москва, 1-й Волоколамский пр-д, д. 10, стр. 1), тел. 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru  
**Загнетко Михаил Анатольевич** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, главный конструктор средств радиосвязи, ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт» (105094, Россия, г. Москва, ул. Гольяновская, 7а, стр. 1), e-mail: mzagnetko@gmail.com

Литвиненко Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: litvinvp@gmail.com

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF FLIGHT TESTS OF TRANSMISSION OF HIGH-SPEED TARGET INFORMATION WITH QAM AND OFDM MODULATION

D.G. Pantenkov<sup>1</sup>, M.A. Zagnetko<sup>2</sup>, V.P. Litvinenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>“Kronstadt”, Moscow, Russia

<sup>2</sup>“Moscow Scientific Research Television Institute”, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** currently, robotic systems (RS) and complexes of various bases, including unmanned aerial vehicles (UAVs), have become particularly relevant. At the same time, any robotic vehicle is equipped with a wide range of payloads (sensors), from which it is possible to transmit information about the environment to a remote operator in real time, which, through its analysis and interpretation, will make certain decisions. Taking into account the fact that modern sensors have very high resolution capabilities, the amount of information that is recorded in internal memory and transmitted to a remote operator via a radio channel can be hundreds of megabits or even units of gigabits. In this case, the task of optimal selection of the signal-code design of the radio signal in the channel of the target information reset becomes urgent, on which the achievable throughput mainly depends. This article reviews the results of flight tests in terms of transmitting target information from a flight-lifting vehicle (FLV) to a stationary ground control and information processing station (GCIPS), a promising method of modulation of a radio signal based on OFDM (multiplexing with orthogonal frequency division of channels), and also presents a comparison of the energy parameters of a radio line when transmitting target information using classical quadrature amplitude modulation of QAM and OFDM signal, when a set of subcarriers in a common band are modulated by modulations with different encoding rates

**Key words:** flight-lifting equipment, target information reset radio channel, radio signal, modulation, QAM, OFDM, target information transmission rate, radio signal spectral efficiency, energy reserves, flight test results, hardware implementation, antennas, microwave modules

### References

1. Polynkin A.V., Le H.T. “Investigation of the characteristics of the radio communication channel with unmanned aerial vehicles”, *News of Tula State University (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2013, no. 7-2, pp. 98-107.
2. Kiselev S.V., Popov A. C., Fedyushkin A.V. “Organization of wireless broadband communications”, *Scientific Reserve (Nauchnyy rezerv)*, 2020, no. 2(10), pp. 32-37.
3. Kazakov L.N., Gerasimov A.B., Selyanskaya E.A., Tsarev A.B. “Scientific and technical groundwork for creating an information exchange system and controlling a group of unmanned aerial vehicles based on a reconfigurable fully connected cluster-type radio network”, *Proc. of the V Military-Scientific Conf.: Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation (Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil RF)*, 2020, pp. 60-70.
4. Klimov V.S., Lopota A.V., Spasskiy B.A. “Trends in the development of ground-based robotic systems for military purposes”, *Robotics and Technical Cybernetics (Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika)*, 2015, no. 3(8), pp. 3-10.
5. Slyusar V. “Data transmission from the UAV: NATO standards”, *Electronics: STB (Elektronika: nauka, tekhnologii, biznes)*, 2010, no. 3, pp. 80-86.
6. Slyusar V. “Radio lines of communication with UAVs. Example of implementation”, *Electronics: STB (Elektronika: nauka, tekhnologii, biznes)*, 2010, no. 5(103), pp. 56-61.
7. Ilyushko V.M., Narytnik T.M. “Data transmission system based on a high-altitude unmanned aerial vehicle (SPD “Phaeton”)”, *Zvyazok*, 2004, no. 7, pp. 38-39.
8. Pantenkov D.G., Gusakov N.V., Egorov A. T., Lomakin A.A., Litvinenko V.P., Velikoivanenko V.I., Liu-Ke-Su E.Y. “Technical implementation of high-speed data radio channel from unmanned aerial vehicle of the device at a ground control station”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 5, pp. 52-71.
9. Pantenkov D.G. “Technical aspects of the creation of radio-technical systems, information and team mates for the complexes with unmanned aerial vehicles”, *Antenna*, 2021, no. 1(269), pp. 11-29.
10. Nevzorov Yu.V., Volodin E.A., Korenkov A. S., Fomina I.A. “System of interspecific communication on an unmanned aerial vehicle”, *Systems and Means of Communication, Television and Radio Broadcasting (Sistemy i sredstva svyazi, televiziya i radioveshchaniya)*, 2013, no. 1-2, pp. 47-49.
11. Tsvetkov K.Yu., Akmolov A.F., Viktorov E.A. “Model of a channel for controlling the transmission of mixed speech and data traffic in a multi-altitude satellite communication system”, *Information and Control Systems (Informatsionno-upravlyayushchie sistemy)*, 2012, no. 3, pp. 63-70.
12. Blagodaryashchev I.V., Antokhin E.A., Fedulin A.M., Panichev V.A. “Experience in the use of simulation modeling of combat operations based on virtual reality technologies for evaluating ground-based robotic complexes for military purposes”, *Robotics and Technical Cybernetics (Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika)*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 94-99.
13. Dolzhenkov N.N., Abramov A.V., Egorov A.T., Lomakin A.A., Pantenkov D.G. “On-board radio communication terminal of an unmanned aerial vehicle” (“Bortovoy terminal radiosvyazi bespilotnogo letatel'nogo apparata”), Patent for utility model 191 165, Russian Federation, IPC H 04 B 7/02 (2006.01), 26.07.2019, bul. 21.
14. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. “Technical realization of critical nodes and devices for receiving broadband radio signals”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 34-45.
15. Tsvetkov V.K., Lyalin K.S., Sinani A.I., Pereverzev A.L., Oreshkin V.I. “System of information exchange and object detection in conditions of complex terrain”, *Nanoindustry*, 2020, no. S5-1(102), pp. 117-125.

16. Verba V.S., Tatarsky B.G. "Complexes with unmanned aerial vehicles. Principles of construction and features of the use of complexes with UAVs" ("Kompleksy s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami. Printsipy postroyeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA"), monograph, Moscow: Radiotekhnika, 2016, 507 p., 821 p.
17. Verba V.S., Tatarsky B.G. "Complexes with unmanned aerial vehicles. UAV-based robotic complexes" ("Kompleksy s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami. Robototekhnicheskie kompleksy na osnove BLA"), monograph, Moscow: Radiotekhnika, 2016, 821 p.
18. Ivankin E.F. "Information systems with posterior processing of measurement results" ("Informatsionnye sistemy s aposteriornoy obrabotkoy rezul'tatov izmereniy"), monograph, Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2008, 168 p.
19. Kuznetsov D.A., Mitroshina P.O., Sagdeev A.K., Semin A.A. "Features of building a radio channel with an unmanned aircraft", *Works of Educational Institutions of Communications (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 82-88.
20. Chirov D.S., Lobov E.M. "The choice of a signal-code design for a command-telemetry radio communication line with unmanned aerial vehicles of medium and long range", *T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2017, vol. 11, no. 10, pp. 21-28.
21. Makarenko S.I. "Robotic complexes for military purposes – current state and prospects of development", *Control, Communication and Security Systems (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2016, no. 2, pp. 73-132. DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10204.
22. Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasilchenko A.S. "Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction", *Control, Communication and Security Systems (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2020, no. 1, pp. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
23. Makarenko S.I., Timoshenko A.V. "Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 2. Fire damage and physical interception", *Control, Communication and Security Systems (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2020, no. 1, pp. 147-197. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106.
24. Makarenko S.I. "Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 3. Electronic suppression of navigation and radio communication systems", *Control, Communication and Security Systems (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2020, no. 2, pp. 101-175. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10205.
25. Makarenko S.I. "Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 4. Functional damage by ultrahigh-frequency and laser radiation", *Control, Communication and Security Systems (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2020, no. 3, pp. 122-157. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10304.
26. Bomstein K.G., Polyansky V.V. "Fight against enemy unmanned aerial vehicles", *Flight (Polyet) All-Russian Scientific and Technical Journal*, 2014, no. 2, pp. 49-60.
27. Semenets V.O., Trukhin M.P. "Methods of countering unmanned aerial vehicles", *High-tech Technologies in Space Research of the Earth (Naukoyemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli)*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 4-12.

Submitted 03.03.2022; revised 19.04.2022

#### Information about the authors

**Dmitriy G. Pantenkov**, Cand. Sc. (Technical), Deputy Chief Designer of radio communication systems, Kronstadt (10, building 1, 1st Volokolamsk ave., Moscow 123060, Russia), 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru

**Mikhail A. Zagnetko**, Cand. Sc. (Technical), Senior Researcher, Chief Designer of radio communication systems, Moscow Scientific Research Television Institute (7a, build. 1, Golyanovskaya str., Moscow 105094, Russia), e-mail: mzagnetko@gmail.com

**Vladimir P. Litvinenko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com



## КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАДИОКОНТРОЛЯ ЛИНИЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Р.И. Буров, В.В. Капитанов

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** при проведении радиоконтроля линий спутниковой связи методом активной диагностики их трактов ретрансляции возникает необходимость в решении ряда задач по поиску, обнаружению и сопоставлению диагностируемых линий спутниковой связи заданному для контроля ретранслятору в интересах выявления достоверных сведений о реальном использовании выделенного частотного ресурса и его соответствия выданным разрешениям на эксплуатацию радиоэлектронных средств. В условиях наличия недокументируемых возможностей по изменению конфигурации трактов ретрансляции и возможного функционирования самовольно эксплуатируемых радиоэлектронных средств решение задачи распознавания наблюдаемых радиоизлучений становится наиболее актуальной задачей. Целью работы является определение на качественном уровне потенциальных возможностей распознавания радиоизлучений при радиоконтроле линий спутниковой связи методом активной диагностики их трактов ретрансляции. Элементом новизны представленного подхода является составление словаря признаков распознавания из наиболее информативных параметров радиоизлучений, позволяющих отследить характерные особенности контролируемых трактов ретрансляции. Показано, что наблюдением в течение определенного времени за изменением параметров диагностирующего сигнала можно добиться однозначного решения задачи определения принадлежности наблюдаемых линий спутниковой связи контролируемому спутнику-ретранслятору. Предложенный подход позволяет обосновать рациональные требования к словарю признаков распознавания радиоизлучений при радиоконтроле линий спутниковой связи при использовании метода активной диагностики их трактов ретрансляции

**Ключевые слова:** испытательные сигналы, радиоконтроль, спутник-ретранслятор, тракт ретрансляции, электромагнитная обстановка

### Актуальность

По мере возрастания возможностей спутниковой связи (СпС), увеличения числа и категорий пользователей, расширения зон обслуживания возрастает загруженность орбит и частотных диапазонов, выделенных для организации спутниковой связи. В этих же частотных диапазонах функционирует множество других радиоэлектронных средств (РЭС): радиорелейных станций, различных сетей сотовой связи, сетей беспроводного доступа и т.д., что в крупных городах и промышленных центрах значительно повышает вероятность возникновения взаимных непреднамеренных помех между указанными сетями и линиями спутниковой связи. Кроме того, наличие недокументируемых возможностей по изменению конфигурации трактов ретрансляции (изменение частотных подставок ствола, поляризации приемной и/или передающей антенн, варьирование шириной диаграммы направленности и точкой прицеливания антенн, смена модуляции сигналов и вида уплотнения каналов и т.д.), а также работа самовольно эксплуатируемых РЭС может при-

вести в этих условиях к возникновению недопустимого уровня взаимных радиопомех [1,2].

Указанные обстоятельства могут привести, с одной стороны, к значительному отличию параметров, предоставленных для согласования в Международный совет электросвязи, от их реальных значений на этапе эксплуатации систем СпС, а с другой - обуславливают необходимость контроля заявленных характеристик ретрансляторов и общей оценки электромагнитной обстановки в системах спутниковой связи. Поэтому основными целями процедуры радиоконтроля будут являться верификация заявленных значений параметров линий СпС их реальному состоянию в интересах формирования на этой основе предложений для надзорных органов, а также поиск, обнаружение и выявление местоположения самовольно эксплуатирующихся РЭС и источников радиопомех.

Важным элементом радиоконтроля является наблюдение за изменением характеристик входа и выхода спутника-ретранслятора, которое будет иметь место, в том числе и при принятии мер помехозащиты (или любом изменении заявленной конфигурации). Высокую оперативную ценность будут нести полученные сведения о характеристиках коммутации входа



и выхода спутника-ретранслятора. При этом решение задач радиоконтроля должно обеспечивать как установление факта изменения конфигурации (смена частотных подставок стволов, вида поляризации, центра и границы зон обслуживания и т.д.), так и определение конкретных значений характеристик линий СпС. Кроме того, необходимо учитывать возможную низкую достоверность сведений о системах СпС, публикуемых в открытой печати, а также неопределенность о целом ряде неопубликованных параметрах (недокументированных возможностях) [3,4].

Радиоконтроль параметров спутников-ретрансляторов и линий СпС может осуществляться либо путем наблюдения сигналов этих линий, либо путем активного воздействия на тракт спутника-ретранслятора (активной диагностики) с последующим определением (оценкой) параметров тракта по изменению характеристик диагностирующего сигнала (ДС). Главным ограничением на способ их применения является требование недопущения снижения пропускной способности (нарушения функционирования) контролируемой линии СпС. В этом случае наиболее целесообразно применение шумоподобных (ШПС) диагностирующих сигналов [5]. При этом решение задачи распознавания наблюдаемых радиоизлучений становится наиболее актуальной задачей.

В общем случае распознавание можно представить в виде преобразования поступающих на вход сведений, в качестве которых рассматриваются значения некоторых параметров (признаков), в выходную информацию, представляющую собой заключение о классе (типе) распознаваемого образа (объекта). Распознавание сложных объектов требует разработки (синтеза) специальных систем, в процессе которой необходимо классифицировать распознаваемые объекты, составить словарь признаков  $x_1 \dots x_n$ , используемый для априорного описания классов с учетом ограничений, и разработать алгоритмы распознавания и управления функционированием системы [6]. По выбранному алгоритму распознавания с учетом сопоставления апостериорных данных о неизвестном объекте  $r_p$  с априорной информацией требуется определить к какому классу из  $R_1 \dots R_l$  он может быть отнесен. Кроме того, необходимо учитывать ограничения, накладываемые на время распознавания и на достоверность принятия решения в условиях различных дестабилизирующих факторов.

Применительно к линиям спутниковой связи при их радиоконтроле имеется возможность классификации объектов и описания классов на нескольких уровнях, на первом из которых объектом распознавания является собственно линия радиосвязи (тракт ретрансляции), а класс представлен отдельным спутником, на втором же должно приниматься решение о принадлежности ИСЗ-ретранслятора соответствующей системе спутниковой связи. Однако при проведении радиоконтроля возможны ситуации, когда число спутников, ретранслирующих испытательный сигнал, неизвестно. В этом случае в зависимости от решаемых задач радиоконтроля возможными путями их решения являются либо попарное различение наблюдаемых радиоизлучений, либо использование процедуры самообучения системы распознавания на основе определения границ классов.

Цель работы - определение на качественном уровне потенциальных возможностей распознавания радиоизлучений при проведении радиоконтроля линий спутниковой связи методом активной диагностики их трактов ретрансляции.

### Описание словаря признаков распознавания

При разработке словаря признаков имеют место следующие ограничения: необходимость априорных сведений, достаточных для определения классов распознаваемых объектов на языке этих признаков; низкая информативность некоторых признаков о динамических параметрах объектов; отсутствие соответствующих измерителей для определения значений некоторых признаков; ограничение на стоимость процедуры распознавания. В этих условиях априорный набор признаков может быть использован лишь в качестве основы при разработке реально применяемого в системе рабочего словаря, в котором необходимо задействовать только наиболее информативные признаки. Выбор признаков, в общем случае, имеет целью разработку алгоритма анализа принимаемых случайных процессов, приводящего к выявлению совокупности достаточно информативных характеристик минимально необходимого объема. Одним из способов выбора признаков может являться содержательный анализ, когда используется некоторая априорная информация о порядке возникновения наблюдаемой реализации случайного процесса.

### Частотные признаки

К частотным признакам распознавания будем относить следующие параметры трактов ретрансляции: частота приема  $f^{\uparrow}$ , частота передачи  $f^{\downarrow}$ , полоса частот  $\Delta f_{st}$  ствола ИСЗ-ретранслятора и частотная подставка ствола  $f_{pst}$ , определяемая как разность частот приема и передачи. При отсутствии априорных данных о конфигурации контролируемого спутника-ретранслятора и/или при изменении частотного плана использование данных параметров в качестве признаков распознавания становится малоинформативным. Вместе с тем, известно [4], что спутник, размещенный на геостационарной орбите, под воздействием ряда дестабилизирующих факторов будет со временем в течение суток описывать на небесной сфере фигуру типа «восьмерки» или «эллипса» с отклонением около одного градуса в направлении север-юг и полградуса в направлении запад-восток. Отказ от учета возникающего при этом доплеровского сдвига частоты (неизвестного в точке контроля) может привести к фазовому рассогласованию опорного и ретранслированного сигналов и результирующему отклику коррелятора, близкому к нулю.

В интересах оценки воздействия доплеровского сдвига частоты ретранслированных диагностирующих сигналов может быть разработана модель дрейфа ИСЗ-ретранслятора, которая с достаточной степенью точности аппроксимирует характер смещения спутника относительно точек наблюдения на поверхности Земли. При этом могут быть определены максимальные скорости дрейфа спутника, зависимости этой скорости в течение суток из нескольких точек наблюдения с различным местоположением, а также выявлены зависимости снижения уровня корреляции ретранслированных сигналов от величины и характера изменения доплеровского сдвига частоты.

Известно, что нормированный отклик коррелятора при структурном согласовании диагностирующего и ретранслированного сигналов определяется величиной их частотно-временного рассогласования. Для сигналов, квадрат огибающей которых равен единице (а именно к такому виду сигналов относятся фазоманипулированные шумоподобные диагностирующие сигналы), частотно-корреляционная функция (функция неопределенности сигнала) при нулевом временном сдвиге  $\tau=0$  будет иметь вид [5]

$$R(\Delta\Omega_d) = (\sin \Delta\Omega_d T_{шдс} / \Delta\Omega_d T_{шдс}), \quad (1)$$

где  $T_{шдс}$  - длительность диагностирующего сигнала;  $\Delta\Omega_d$  - доплеровский сдвиг частоты.

При наличии постоянного на протяжении сигнала доплеровского сдвига частоты на интервале интегрирования будет укладываться больше или меньше (в зависимости от сближения или удаления ИСЗ-ретранслятора и точки наблюдения) периодов высокочастотного заполнения ШПС. Это адекватно появлению дополнительного рассогласования с опорным колебанием или дополнительного набег фазы, определяемого соотношением

$$\Delta\Psi_{дон} = \Delta\Omega_d T_{шдс}. \quad (2)$$

Нетрудно заметить, что при определенном значении неучтенного доплеровского сдвига частоты дополнительный набег фазы на длительности интервала наблюдения будет кратен  $\pi$  ( $\Delta\Psi_{дон} = \Delta\Omega_d T_{шдс} = k\pi$ , где  $k=1,2,\dots$ ). В этом случае результирующий отклик коррелятора, определяемый соотношением (1), практически будет равен нулю. Следовательно, допустимая в рамках заданной достоверности обнаружения ШПС расстройка частот может быть определена исходя из предельного для известной длительности сигнала дополнительного набег фазы  $\Delta\Psi_{дон}$ . В свою очередь, управление длительностью при известном значении  $\Delta\Omega_d$  дает возможность обеспечить бесперехватный по частоте режим синхронизации принимаемого и опорного колебаний и избежать при этом ошибок контроля электромагнитной обстановки в системах спутниковой связи.

Расчет значений скорости дрейфа спутника может быть проведен на основе анализа изменения геометрических соотношений в его взаимном положении относительно точки наблюдения, как иллюстрируется на рис. 1.

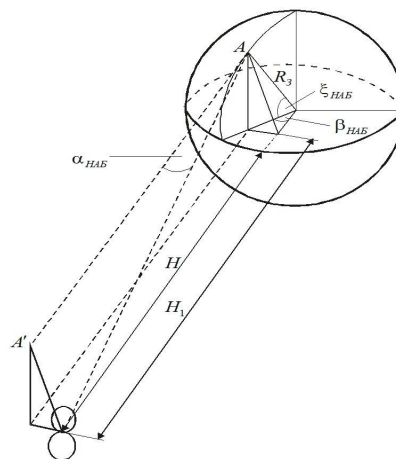


Рис. 1. Геометрическая модель радиоконтроля

Так как заранее неизвестно, по какой из возможных траекторий (лемниската, овал Кассини, эллипс и т.д.) происходит дрейф спутника, то моделирование смещения спутника-ретранслятора можно провести с использованием кривых четвертого порядка с изменением их параметров [7]:

$$\rho^2 = c^2 \cos 2\varphi_{исз} \pm \sqrt{c^4 \cos 2\varphi_{исз} + (a^4 - c^4)}, \quad (3)$$

где  $c$  - фокусное расстояние. При этом варьированием произвольного параметра  $a$  можно обеспечить моделирование дрейфа спутника относительно подспутниковой точки по различным траекториям (например, по лемнискате, как представлено на рис. 2).

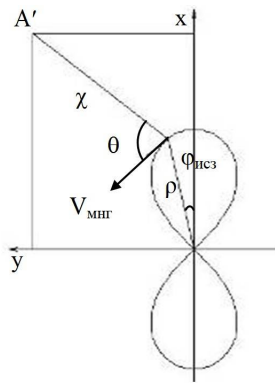


Рис. 2. Моделирование траектории дрейфа ИСЗ-ретранслятора

При движении спутника-ретранслятора значение величины  $\chi$  (проекция направления из точки А на спутник в плоскости его орбиты) будет определяться выражением:

$$\chi = \sqrt{(R_3 \sin \zeta - \rho \cos \varphi)^2 + (R_3 \cos \zeta \sin \beta - \rho \sin \varphi)^2}, \quad (4)$$

где  $\zeta_{наб}$  и  $\beta_{наб}$  - широта и долгота наблюдения относительно подспутниковой точки, соответственно;  $R_3$  - радиус Земли. Величина  $H_1$ , характеризующая расстояние от точки наблюдения до плоскости дрейфа ИСЗ, будет постоянной и определяться в виде

$$H_1 = H + R_3(1 - \cos \zeta_{наб} \cos \beta_{наб}), \quad (5)$$

где  $H$  - высота орбиты спутника-ретранслятора. Следовательно, будет изменяться угол наблюдения  $\alpha_{наб}$ , под которым просматривается ИСЗ из точки А на поверхности Земли  $\alpha_{наб} = \arctg(H_1/\chi)$ .

Для расчета числовых значений доплеровской скорости  $V_d$  в каждой точке моделируемой траектории необходимо вычислить проекцию вектора скорости  $V_{мгн}$  на проекции направления на спутник  $\chi$ , после чего получим

$$V_d = V_{мгн} \cos \theta \cos \alpha_{наб}. \quad (6)$$

Угол  $\theta$  между проекцией  $\chi$  и вектором скорости  $V_{мгн}$  может быть получен из выражения:

$$\theta = \arctg \left( \frac{R_3 \cos \zeta_{наб} \sin \beta_{наб} - \rho \sin \varphi_{исз}}{R_3 \sin \zeta_{наб} - \rho \cos \varphi_{исз}} \right) - \arctg \left( \frac{c^2 - \rho^2}{c^2 + \rho^2} \right). \quad (7)$$

Вектор мгновенной скорости спутника  $V_{мгн}$  направлен по касательной к траектории дрейфа, а его значение (модуль) может быть как постоянным, так и переменным во времени, что обуславливает соответствующие изменения доплеровского сдвига частоты ретранслированных сигналов. При равномерном дрейфе спутника по рассмотренным выше фигурам средняя скорость движения  $V_{ср}$  будет составлять от 44 м/с до 54 м/с. Для учета неравномерности изменения скорости дрейфа ИСЗ относительно подспутниковой точки в модели были рассмотрены следующие ситуации.

Вариант 1. Максимальное значение, равное  $V_{мгн} = 2 \cdot V_{ср}$ , модуль вектора скорости принимает на краях малой полуоси для эллипса и овала Кассини, для лемнискаты - в точке перегиба, а минимальное значение, равное  $V_{мгн} = 0$  - по краям большой полуоси для всех типов фигур.

Вариант 2. Минимальное значение, равное  $V_{мгн} = 0$ , модуль вектора скорости принимает на краях малой полуоси для эллипса и овала Кассини, для лемнискаты - в точке перегиба, а максимальное значение, равное  $V_{мгн} = 2 \cdot V_{ср}$  - по краям большой полуоси для всех типов фигур.

Вариант 3. Модуль вектора скорости в течение суток остается постоянным при движении по всем типам фигур и равным  $V_{мгн} = V_{ср}$ .

Диагностирующий сигнал на частоте  $f_{изл}^{\uparrow}$  будет принят спутником на частоте  $f_{изл}^{\uparrow*} = f_{изл}^{\uparrow} \pm f_d$ , где  $c$  - скорость света,  $f_d = (v_d/c)f_{изл}^{\uparrow}$  - доплеровский сдвиг частоты, и ретранслирован на частоте  $f_{изл}^{\downarrow} = f_{изл}^{\uparrow*} - \Delta f_R$ , где  $\Delta f_R$  - значение частотной подставки ствола ретранслятора. На рис. 3 представлены графики зависимости величины доплеровского сдвига частоты  $f_d$  от времени при дрейфе ИСЗ по фигуре типа лемниската для различных вариантов изменения  $V_{мгн}$ .

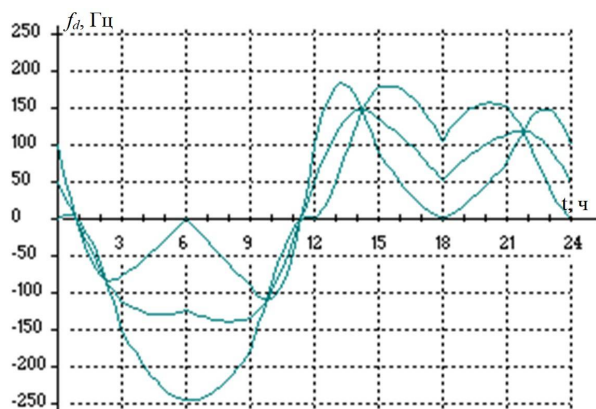


Рис. 3. Зависимость доплеровского сдвига частоты в течение суток

Представленные зависимости изменения частоты принимаемых ИСЗ испытательных сигналов вследствие эффекта Доплера получены на основе моделирования процесса ретрансляции сигналов движущимся спутником применительно к диапазону частот 6 ГГц и размещении точки наблюдения в координатах  $\zeta_{\text{наб}} = 58^\circ$ ,  $\beta_{\text{наб}} = 40^\circ$ . Из представленных зависимостей можно сделать вывод о том, что во всех случаях имеется монотонное периодическое изменение скорости дрейфа ИСЗ в направлении точек наблюдения, индивидуальное для каждого из вариантов дрейфа.

Ретранслированный испытательный сигнал будет принят средствами радиоконтроля на частоте

$$f_{\text{исз}}^{\downarrow*} = (f_{\text{исз}}^{\uparrow*} - \Delta f_R) \pm (v_d/c)(f_{\text{исз}}^{\uparrow*} - \Delta f_R). \quad (8)$$

Следовательно, сдвиг частоты ретранслированного диагностирующего сигнала, обусловленного эффектом Доплера вследствие дрейфа ИСЗ-ретранслятора на геостационарной орбите, может быть определен по формуле

$$\Delta f_d = f_{\text{исз}}^{\uparrow} [(2v_d/c) \pm (v_d/c)^2] - \Delta f_R (v_d/c), \quad (9)$$

а в случае разнесения точек излучения и приема диагностирующих сигналов

$$\Delta f_d = f_{\text{исз}}^{\uparrow} \{[(v_{d1} + v_{d2})/c] \pm (v_{d1} \cdot v_{d2})/c^2\} - \Delta f_R (v_{d2}/c), \quad (10)$$

где  $v_{d1}$  - доплеровская скорость смещения ИСЗ-ретранслятора в направлении точки передачи;  $v_{d2}$  - доплеровская скорость смещения ИСЗ-ретранслятора в направлении точки приема.

Реализация разработанной модели позволяет определить области пространства (поверхности Земли) с одинаковым доплеровским сдвигом частоты в зависимости от пространственного разнесения точек передачи (приема) диагностирующих сигналов применительно к

различным диапазонам частот, что иллюстрируется на рис. 4.

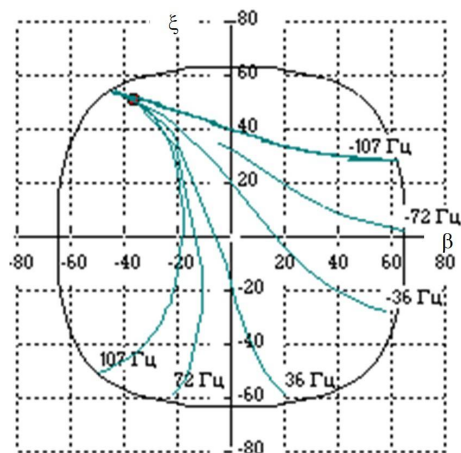


Рис. 4. Зависимость доплеровского сдвига частоты в течение суток

Расчеты показывают, что для различных диапазонов частот, используемых в практике систем СпС, максимальный доплеровский сдвиг частоты будет составлять величину от единиц до десятков сотен герц. В то же время перемещение спутника по рассматриваемым фигурам приводит к появлению так называемых «окон прозрачности», где приращение (уменьшение) частоты диагностирующих сигналов будет весьма незначительным. Особенно этот эффект может появляться при экваториальном размещении точек наблюдения и движении ИСЗ-ретранслятора по эллипсу, когда влияние эффекта будет незначительным в течение более полутора часов в сутки.

Доплеровский сдвиг частоты ведет к появлению дополнительного набега фазы  $\Delta\psi_{\text{дон}}$ , влекущего за собой возможную компенсацию откликов от различных частей сигнала и результирующему отклику коррелятора, определяемому соотношением, практически равным нулю. При задании максимальных потерь энергии ШПС величиной в 20% предельный набег фазы составит  $\Delta\psi_{\text{дон}} = \pi/4$ . В этом случае, учитывая (1), могут быть найдены области длительностей ШПС, обеспечивающих заданное неразрушение отклика коррелятора при обработке сигнала. Следовательно, задавая максимальный дополнительный набег фазы диагностирующего сигнала, можно расчетным путем определить допустимую длительность ШПС, при которой разрушение отклика коррелятора будет не больше заданного. Ориентируясь на полученное значение  $T_{\text{иос}}$ , можно выбирать полосу частот ШПС и управлять энергетическим



и частотно-временным ресурсом средств активной диагностики.

### Поляризационные параметры

Результаты моделирования показывают, что в условиях априорной неопределенности об используемом виде поляризации антенн спутника-ретранслятора для гарантированного приема ретранслированных сигналов необходимо увеличить мощность диагностирующих сигналов на величину от 7 до 40 Дб. Устранение указанной неопределенности и полученные при этом сведения могут быть использованы для решения задачи распознавания и определения принадлежности линий спутниковой связи заданному для контроля ретранслятору. Однако определение лишь вида используемой поляризации сигналов в сложной электромагнитной обстановке, когда может наблюдаться до 10-15 спутников (50-85 трактов ретрансляции) или при изменении конфигурации контролируемой системы, не позволяет в большинстве случаев провести распознавание наблюдаемых линий спутниковой связи. Именно поэтому требуется выявить дополнительные поляризационные параметры, на основании которых возможно сформировать признаки распознавания, позволяющие однозначно определить принадлежность обнаруженных сигналов заданному для контроля ретранслятору.

Модуль напряжения на нагрузке будет зависеть от степени согласования поляризации передающей антенны спутника и приемной антенны средств контроля

$$|U| = \frac{kE_0}{2} \sqrt{1 + \frac{4k_c k_a + (1 - k_c^2)(1 - k_a^2) \cos 2\beta_e}{(1 + k_c^2)(1 + k_a^2)}}, \quad (11)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий ослабление диагностирующего сигнала при ретрансляции и распространении,  $E_0$  - напряженность электромагнитной волны (ЭМВ),  $k_c$  - коэффициент эллиптичности приемной антенны средств радиоконтроля,  $k_a$  - коэффициент эллиптичности передающей антенны спутника,  $\beta_e$  - угол между большими полуосями эллипсов поляризации передающей антенны спутника и приемной антенны средств радиоконтроля.

В случае строго круговой поляризации электромагнитной волны диагностирующего сигнала модуль напряжения на нагрузке (11) может быть определен выражением

$$|U_{c,n}| = kE_0 \sqrt{1 \pm \frac{k_a}{(1 + k_a^2)}}, \quad (12)$$

где знак минус характеризует несовпадение поляризации передающей ИСЗ и приемной антенн средств радиоконтроля, а знак плюс - совпадение.

При строго линейной поляризации электромагнитной волны диагностирующего сигнала формула (11) трансформируется к виду

$$|U_L| = kE_0 \sqrt{1 \pm \frac{(1 - k_a^2) \cos 2\beta_e}{(1 + k_a^2)}}. \quad (13)$$

Совместное решение (12) и (13) относительно  $k_a$  и  $\beta_e$

$$k_a = \frac{|U_c| - |U_H|}{|U_c| + |U_H|}, \quad \beta_e = \frac{1}{2} \arccos \frac{2|U_L|^2 - |U_c|^2 - |U_H|^2}{2|U_c||U_H|}. \quad (14)$$

позволяет определить значения искомых параметров приемной антенны спутника-ретранслятора при проведении радиоконтроля. Зависимости, рассчитанные согласно (14) и представленные на рис. 5, наглядно иллюстрируют возможность выявления характерных особенности антенных систем контролируемых ретрансляторов, обусловленных, в том числе, и возможными флуктуациями поляризации при распространении диагностирующих сигналов.

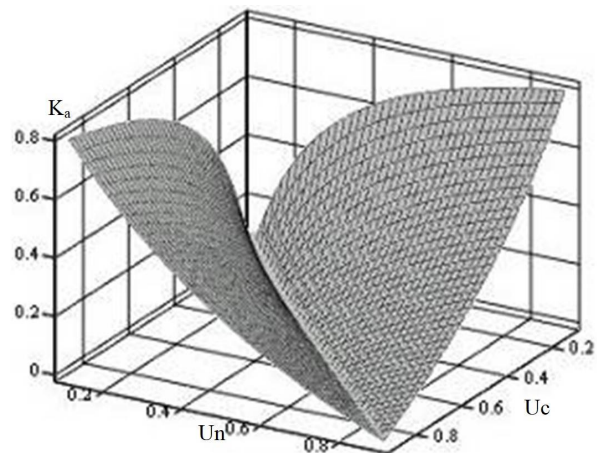


Рис. 5. К определению поляризационных параметров

Следовательно, определение поляризационных параметров приемных антенн ИСЗ-ретрансляторов может быть проведено аналитически на основе измерения уровней принимаемых диагностирующих сигналов, излученных последовательно с круговой правой, круговой левой и линейными поляризациями ЭМВ. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость использования антенных устройств, обеспечивающих функционирование средств радиоконтроля как при линейных, так и при круговых видах поляризации ЭМВ. Техническая реализация данного принципа может быть построена на базе параболических или зеркаль-



ных антенн с различными видами облучателей, с выходов которых снимается уровень ретранслированного сигнала, и по результатам сравнения определяется тип и характеристики поляризации излученной спутником ЭМВ.

### Пространственные характеристики

Повышение загруженности орбит систем спутниковой связи, неидеальность диаграмм направленности антенных систем ИСЗ-ретрансляторов и средств радиоконтроля, а также наличие дестабилизирующих факторов и ошибок в юстировке антенн обуславливает возможность приема радиосигналов, ретранслированных различными спутниками. При этом количество орбитальных позиций, излучение с которых доступно в точке контроля, прямо пропорционально ширине диаграммы направленности антенных систем средств радиоконтроля. Кроме того, из-за наличия вышеизложенных дестабилизирующих факторов орбиты спутников возможен прием сигналов от ретрансляторов, расположенных вне непосредственно видимых орбитальных позиций. В этих условиях предварительная селекция принимаемых излучений может основываться на оценке времени задержки ретранслированных сигналов, которая в общем случае имеет вид

$$\tau = t_r + t_{ks} + t_{kc}, \quad (15)$$

где  $t_r$  - время распространения сигнала,  $t_{ks}$  - время коммутации на борту ретранслятора,  $t_{kc}$  - время реакции аппаратуры средств контроля. Так как слагаемые в выражении (15) являются случайными величинами, то и общее время задержки  $\tau$  также является случайным, и возможны ситуации равенства задержек сигналов, ретранслированных спутниками, расположенными в соседних орбитальных позициях, что иллюстрируется на рис. 6 в виде графика зависимости времени распространения  $t_r^*$  от разностной долготы точки контроля и заданной орбитальной позиции, рассчитанной согласно

$$t_r^* = \frac{2\sqrt{H^2 + R_z^2 - 2HR_z \cos \xi_c \sin(\beta_s - \beta_c)}}{c}, \quad (16)$$

где  $H$  - высота геостационарной орбиты,  $R_z$  - радиус Земли,  $\beta_c$  - долгота орбитальной позиции контролируемого ИСЗ,  $\beta_s, \xi_s$  - географические координаты средств радиоконтроля,  $c$  - скорость света.

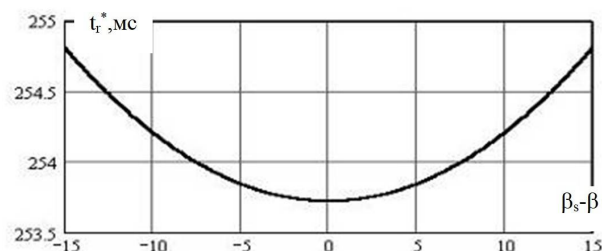


Рис. 6. Зависимость времени распространения при изменении относительной долготы орбитальной позиции

Данный график наглядно демонстрирует равенство  $t_r^*$ , значение которого априорно может быть принято в качестве математического ожидания  $\tau$  для спутников, расположенных в диаметральных относительно заданной орбитальных позициях. В этих условиях возможным выходом может являться использование данных о характерном изменении в течение суток времени распространения сигнала, обусловленном паразитным дрейфом спутника-ретранслятора вокруг подспутниковой точки. Следуя приведенным выше рассуждениям, можно показать, что даже в наихудших для распознавания условиях (диагностирующие сигналы ретранслированы спутниками, размещенными в одной орбитальной позиции и дрейфующими с минимальным угловым разном  $(\Delta\varphi = 10^\circ)$  между положениями на траекториях одного вида) выбором рациональной длительности сигнала имеется принципиальная возможность получения значительного (до 80 процентов) отличия между откликами коррелятора.

### Выводы

Проведенное моделирование дрейфа спутников-ретрансляторов показывает, что дополнительный признак распознавания, основанный на учете обусловленного этим дрейфом доплеровского сдвига частоты, обладает высокой разрешающей способностью и является информативным в течение большей части суток. С другой стороны, изменяя длительность и отслеживая характер изменения откликов коррелятора на диагностирующие сигналы распознаваемых линий связи, имеется возможность с использованием данного признака определить как количество функционирующих в контролируемом диапазоне спутников, так и сопоставить (идентифицировать) каждому из них наблюдаемые тракты ретрансляции.

Анализируя представленные зависимости, нетрудно заметить, что изменением параметров

диагностирующего сигнала можно добиться однозначного решения задачи определения принадлежности наблюдаемых линий СпС с использованием признака распознавания, учитывающего изменение времени распространения сигнала вследствие дрейфа ИСЗ-ретранслятора. Кроме того, в условиях априорной неопределенности о характеристиках дрейфа спутника-ретранслятора (вид траектории, угловой сдвиг между положениями на траектории) данные зависимости могут служить исходными данными для выбора (формирования) параметров диагностирующих сигналов в целях обеспечения информативности рассматриваемого признака в течение большей части суток.

Проведенный анализ возможностей использования метода активной диагностики при радиоконтроле линий СпС указывает, что потенциально решение задач оценки (фильтрации) параметров шумоподобных диагностирующих сигналов дает возможность попарного разделения наблюдаемых радиоизлучений и

определение на этой основе конфигураций контролируемых спутников-ретрансляторов.

#### Литература

1. Кантор Л.Я. Справочник по спутниковой связи и вещанию. М.: Радио и связь, 1983. 287 с.
2. Бородин С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. М.: Радио и связь, 1990. 272 с.
3. Калашников Н.И. Системы связи через ИСЗ. М.: Связь, 1989. 211 с.
4. Фортушенко А.Д. Основы технического проектирования систем связи через ИСЗ. М.: Связь, 1990. 261 с.
5. Тузов Г.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
6. Горелик А.Л. Методы распознавания. М.: Высш. шк., 1977. 221 с.
7. Бронштейн И.Н. Справочник по математике. М.: Наука, 1986. 574 с.
8. Гурский Д.А. Вычисления в MathCad. СПб.: Питер, 2006. 544 с.
9. Петров Ю.М. Обеспечение достоверности и надежности компьютерных расчетов. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 160 с.
10. Грибов Э.Б. Нелинейные явления в приемопередающем тракте аппаратуры связи. М.: Связь, 1971. 246 с.

Поступила 04.03.2022; принята к публикации 19.04.2022

#### Информация об авторах

**Буров Роман Иванович** - канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), тел.: +7 908 130 67 09, e-mail: bri555@mail.ru

**Капитанов Владимир Валерьевич** - канд. техн. наук, преподаватель кафедры радиотехники, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), тел.: +7 904 211 47 08, e-mail: kap56@mail.ru

## QUALITATIVE ASSESSMENT OF THE RECOGNITION OF RADIO EMISSIONS DURING RADIO MONITORING OF SATELLITE COMMUNICATION LINES

R.I. Burov, V.V. Kapitanov

Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces

“N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

**Abstract:** when carrying out radio monitoring of satellite communication lines by the method of active diagnostics of their relay paths, it becomes necessary to solve a number of problems of searching, detecting and comparing diagnosed satellite communication lines with a repeater specified for monitoring in order to identify reliable information about the actual use of the allocated frequency resource and its compliance with the issued operating permits radio electronic means. In the presence of undocumented possibilities for changing the configuration of relay paths and the possible functioning of unauthorized radio electronic means, solving the problem of recognizing observed radio emissions becomes the most urgent task. The aim of the work is to determine at a qualitative level the potential possibilities of recognizing radio emissions during radio monitoring of satellite communication lines by the method of active diagnostics of their relay paths. The element of novelty of the presented approach is the compilation of a glossary of recognition features from the most informative parameters of radio emissions, which make it possible to trace the characteristic features of the controlled relay paths. We showed that by monitoring for a certain time the change in the parameters of the diagnostic signal, it is possible to achieve an unambiguous solution to the problem of determining whether the observed satellite communication lines belong to a controlled relay satellite. The proposed approach makes it possible to substantiate the rational requirements for the dictionary of radio emission recognition features in the radio monitoring of satellite communication lines using the method of active diagnostics of their relay paths

**Key words:** test signals, radio monitoring, repeater satellite, retransmission tract, electromagnetic environment

#### References

1. Kantor L.Ya. "The handbook on a satellite communication and broadcasting" ("Spravochnik po sputnikovoy svyazi i veshchaniyu"), Moscow: Radio i svyaz', 1983, 287 p.
2. Borodich S.V. "EMS of land and space radio services" ("EMS nazemnykh i kosmicheskikh radiosluzhb"), Moscow: Radio i svyaz', 1990, 272 p.
3. Kalashnikov N.I. "Communication system through an artificial satellite" ("Sistemy svyazi cherez ISZ"), Moscow: Svyaz', 1989, 211 p.
4. Fortushenko A.D. "Bases of technical designing of communication systems through an artificial satellite" ("Osnovy tekhnicheskogo proektirovaniya sistem svyazi cherez ISZ"), Moscow: Svyaz', 1990, 261 p.
5. Tuzov G.I. "Noise immunity of radio systems with difficult signals" ("Pomekhozashchishchennost' radiosistem so slozhnymi signalami"), Moscow: Radio i svyaz', 1985, 264 p.
6. Gorelik A.L. "Identification methods" ("Metody raspoznavaniia"), Moscow: Vysshaia shkola, 1977, 221 p.
7. Bronstein I.N. "Handbook of mathematics" ("Spravochnik po matematike"), Moscow: Nauka, 1986, 574 p.
8. Gurskiy D.A. "Calculation in MathCad" ("Vychisleniya v MathCad"), St.-Petersburg: Piter, 2006, 544 p.
9. Petrov Yu.M. "Providing reliability and reliability of computer calculations" ("Obespechenie dostovernosti i nadezhnosti komp'yuternykh raschetov"), St.-Petersburg: BHV-Peterburg, 2010, 160 p.
10. Gribov E.B. "Nonlinear phenomena in the receiving-transmitting path of communication equipment" ("Nelineynye yavleniya v priyemo-peredayushchem trakte apparatury svyazi"), Moscow: Svyaz', 1971, 246 p.

Submitted 04.03.2022; revised 19.04.2022

#### Information about the authors

**Roman I. Burov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54a Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel.: +7 908 130 67 09, e-mail: bri555@mail.ru

**Kapitanov V. Valerevich**, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54a Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel.: +7 904 211 47 08, e-mail: kap56@mail.ru

## ДИНАМИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМАЯ BI-QUAD АНТЕННА НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

К.А. Бердников<sup>1</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, Ю.Г. Пастернак<sup>1,2</sup>, В.А. Пендюрин<sup>3</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>ЗАО «ИРКОС», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи»,  
г. Воронеж, Россия

<sup>4</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается Bi-Quad антенна с рабочей частотой 2.4 ГГц и двумя активными рефлекторами на основе реконфигурируемого метаматериала с электронным управлением на основе рin-диодов. Благодаря предложенной конструкции удастся обеспечить работу антенны в трех режимах: прозрачные рефлекторы, когда формируется двунаправленное излучение; коммутация нижней пластины метаматериала и отсутствие коммутации верхней пластины, что приводит к формированию направленного излучения вверх с увеличенным значением коэффициента направленного действия; коммутация верхней пластины метаматериала и прозрачный режим нижней – формирование направленного вниз излучения. Таким образом, обеспечивается работа антенны в трех режимах с возможностью быстрого динамического перестроения режимов на основе коммутаций рin-диодов в ячейках трехмерной структуры метаматериала. Результаты работы полученной конструкции подтверждаются результатами моделирования с использованием метода Вейланда в электродинамике, при этом для повышения точности результатов рin-диоды в активном режиме заменялись сосредоточенными элементами в виде spice-моделей, а в выключенном режиме эквивалентными схемами. Таким образом, были получены результаты с наибольшей точностью для предложенной конструкции антенны, которые иллюстрируют все режимы работы при коммутациях пластин метаматериала

**Ключевые слова:** активный метаматериал, активный рефлектор, реконфигурируемая антенна

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-57.2020.9

### Введение

Применение активных антенных систем в современных задачах связи является важной задачей, так как это позволяет осуществить управление характеристиками излучателя, объединив в одну конструкцию антенны несколько режимов работы. Одним из наиболее перспективных способов управления характеристиками антенны является применение метаматериалов.

Пример использования активного метаматериала приводится в работе [1], так путем выполнения коммутаций в узлах ячеек метаматериала с использованием рin-диодов удастся обеспечить управление характеристиками рефлектора для планарной антенны. Недостатком же используемой авторами конструкции является использование планарной структуры как антенны, так и метаматериала, что приводит к возникновению дополнительных потерь в пластине диэлектрика.

Другим примером активных антенн являются конструкции метаматериалов, которые

непосредственно помещаются в конструкцию антенны, как в работе [2]. Благодаря использованию трехмерной конструкции метаматериала удастся обеспечить управление характеристиками рупорной антенны с минимальными потерями путем выполнения коммутаций рin-диодами в узлах конструкции. Применение такой конструкции позволяет обеспечить быстрое переключение режимов работы антенны, достигая этим отклонения главного лепестка антенны.

Помимо этого, использование радиокомпонентов в антеннах может применяться для управления типами поляризации электромагнитных волн, как в работе [3]. Благодаря использованию рin-диодов удастся обеспечить переключение типов поляризации от правой круговой до левой круговой. Применение такой конструкции позволяет повысить помехозащищенность связи, а также применить новый способ модуляции сигналов на основе типов круговой поляризации в процессе передачи электромагнитных волн.

В работе авторов [4] предлагается применение рin-диодов в антенной системе для сетей пятого поколения. Так, благодаря использова-

нию радиокомпонентов удается достичь переключения режимов работы антенны, а следовательно, и осуществить управление диаграммой направленности излучателя. Помимо этого, для улучшения характеристик антенны предлагается использование пластины пассивного метаматериала, что также показывает перспективность использования метаматериалов в миллиметровом диапазоне радиоволн.

Таким образом, на основе приведенных примеров использование активных антенн на основе радиокомпонентов, а также метаматериалов позволяет обеспечить управление характеристиками антенн во всех диапазонах радиоволн. В данной работе предлагается конструкция активного метаматериала, который используется в роли активного рефлектора для Vi-Quad антенны на частоте 2.4 ГГц.

### Конструкция антенны

В процессе исследования была разработана антенна Vi-Quad с двумя активными рефлекторами на основе метаматериала – рис. 1.

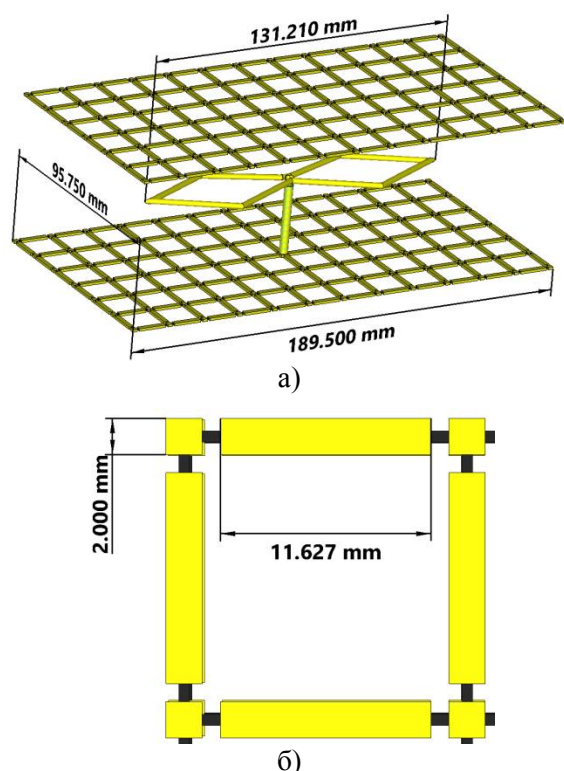


Рис. 1. Конструкция антенны с двумя активными рефлекторами: а) полная модель антенны; б) конструкция ячейки метаматериала

Как видно из рисунка, метаматериал, который используется в роли активного рефлектора, представляет из себя 3D-структуру мета-

материала с длиной плеча порядка 1/10 длины волны на частоте 2.4 ГГц. В качестве коммутирующих устройств используются pin-диоды в корпусе SOD882, которые имеют малые размеры и могут быть удобно установлены в конструкцию метаматериала. На основании полученной конструкции производилось моделирование режимов работы антенны. Благодаря использованию активного метаматериала стоит ожидать трех режимов работы антенны:

1. Метаматериал отключен, при этом рефлекторы становятся прозрачными для электромагнитных волн, что формирует двунаправленную диаграмму направленности;

2. Коммутация одной из пластин метаматериала, что формирует направленное излучение в сторону выключенной пластины метаматериала.

Таким образом, становится возможным сформировать многорежимную антенну для частот 2.4 ГГц. Так, на рис. 2 приводится график  $S_{11}$ -параметров антенны, который позволяет определить рабочий диапазон антенны.

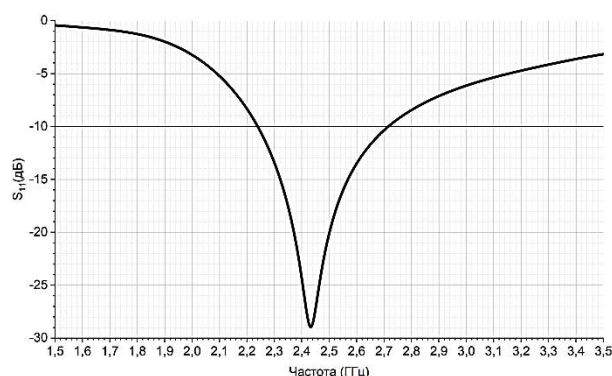


Рис. 2. График  $S_{11}$  для разработанной конструкции антенны

На основе полученной зависимости видно, что рабочий диапазон разработанной конструкции антенны по уровню  $S_{11}$  -10 дБ (КСВН=2) составляет 2.24-2.72 ГГц, что соответствует целевому рабочему диапазону. При этом пластины метаматериала сохраняют свои характеристики в частотном диапазоне, который значительно шире рабочего диапазона антенны. Произведем исследование всех режимов работы антенны путем выполнения электродинамического моделирования.

Отдельно стоит выделить, что для учета всех потерь, а также построения наиболее точной модели необходимо использовать сосредоточенные элементы, которые будут имитировать pin-диоды в активном и пассивном режимах. В данном случае в процессе выполнения



моделирования замкнутые *pin*-диоды заменялись *spice*-моделями, а разомкнутые – эквивалентной схемой. Было получено, что в активном режиме *pin*-диод в исследуемом диапазоне частот имеет сопротивление менее 10 Ом, а в выключенном режиме более 50 кОм. На основании такой модели произведем моделирование всех режимов работы антенны, которые приводятся на рис. 3.

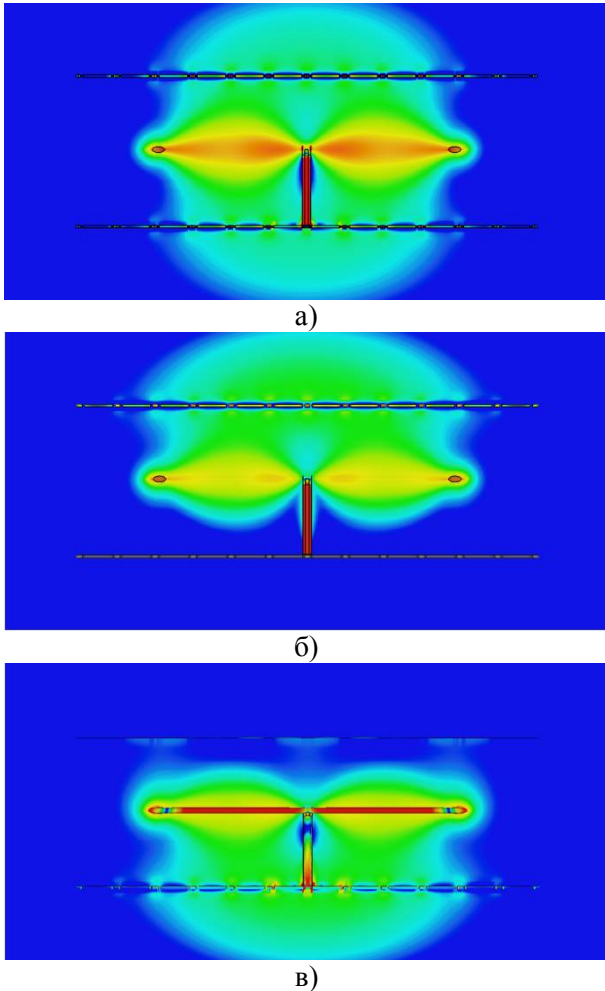


Рис. 3. Картины Е-поля при разных режимах работы антенны: а) прозрачный режим работы (*pin*-диоды в выключенном режиме); б) коммутация нижней пластины метаматериала, верх выключен; в) коммутация верхней пластины, низ выключен

Как видно по картинам электромагнитного поля, удастся обеспечить 3 режима работы антенны, таким образом, стоит ожидать формирования 3 видов диаграмм направленности – все-направленной и с направлением вверх или вниз.

Рассмотрим полученные характеристики диаграмм направленности при всех возможных режимах работы. Полученные картины диа-

грамм направленности в вертикальной плоскости приводятся на рис. 4.

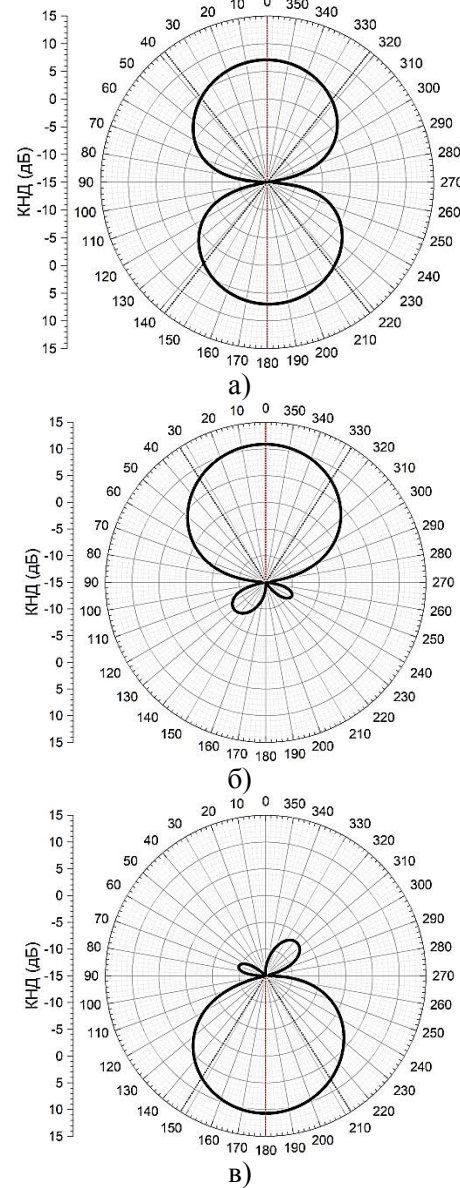


Рис. 4. Диаграммы направленности антенны при всех режимах работы: а) прозрачный режим; б) прозрачный верхний рефлектор; в) прозрачный нижний рефлектор

Таким образом, по полученным картинам диаграмм направленности видно, что на частоте 2.4 ГГц удастся достичь ожидаемых картин диаграмм направленности при всех режимах работы активного метаматериала. Для анализа полученных характеристик диаграмм направленности на частоте 2.4 ГГц воспользуемся таблицей, в которой приводятся основные характеристики разработанной конструкции антенны на основе активного метаматериала.

## Характеристики диаграмм направленности для Bi-Quad антенны с двумя рефлекторами

Характеристика сравнения	Прозрачный режим	Коммутация нижнего рефлектора (прозрачный верхний)	Коммутация верхнего рефлектора (прозрачный нижний)
Направление главного лепестка, °	0, 180	0	180
КНД, дБ	7.1	10.9	10.7
Ширина главного лепестка по уровню 3 дБ, °	76.1 (в обоих направлениях)	65	64.3
Передне/заднее отношение, дБ	0.13	25.09	24.30
КПД, %	87	99.3	99.3

Полученные результаты показывают, что применение предложенной конструкции позволяет обеспечить 3 режима работы антенны, при этом переключение режимов работы осуществляется полностью электронно за счет использования рп-диодов, также было получено, что в исследуемом диапазоне частот КПД антенны остается выше 80%.

## Заключение

Предложенная в данной работе антенна на основе активного метаматериала обладает 3

режимами работы, которые позволяют реализовать как всенаправленное излучение, так и направленное. Применение трехмерной конструкции метаматериала позволило достичь высокой эффективности работы антенны с минимальными потерями и возможностью быстрого переключения режимов на основе коммутирующих устройств (рп-диодов). Таким образом, можно сделать вывод, что применение современных конструкций метаматериалов в антеннах позволяет не только улучшать характеристики распространения радиоволн, но и осуществлять управление основными характеристиками антенн.

## Литература

1. Design of a PIN Diode-Based Reconfigurable Metasurface Antenna for Beam Switching Applications/ S. Chaimool, T. Hongnara, C. Raklua, P. Akkaraekthalin, Y. Zhao // International Journal of Antennas and Propagation. 2019. Vol. 2019. Article ID 7216324. 7 p.
2. Исследование влияния интегрированного в конструкцию пирамидального рупора метаматериала на диаграмму направленности / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, М.А. Сиваш, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 107-113.
3. An Orbital Angular Momentum (OAM) Mode Reconfigurable Antenna for Channel Capacity Improvement and Digital Data Encoding/ B. Liu, G. Lin, Y. Cui et al. // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. No. 9852. 9 p.
4. Mingle S., Hassoun I., Kamali W. Beam-Steering in Metamaterials Enhancing Gain of Patch Array Antenna Using Phase Shifters for 5G Application // IEEE EUROCON 2019 - 18th International Conference on Smart Technologies. 2019. pp. 1-4.

Поступила 27.12.2021; принята к публикации 15.04.2022

## Информация об авторах

**Бердников Кирилл Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Ищенко Евгений Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Пастернак Юрий Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84); ведущий инженер, ЗАО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternakyg@mail.ru

**Пендюрин Владимир Андреевич** – генеральный директор, АО НПП «Автоматизированные системы связи» (394062, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, д. 108, офис 415), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

# DYNAMICALLY CONTROLLED BI-QUAD ANTENNA BASED ON ACTIVE METAMATERIAL

K.A. Berdnikov<sup>1</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, Yu.G. Pasternak<sup>1,2</sup>, V.A. Pendyurin<sup>3</sup>, S.M. Fyedorov<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>JSC "IRKOS", Moscow, Russia

<sup>3</sup>Research and Production Enterprise "Automated Communication Systems", Voronezh, Russia

<sup>4</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the paper considers a Bi-Quad antenna with an operating frequency of 2.4 GHz and two active reflectors based on a reconfigurable metamaterial with electronic control based on pin diodes. Thanks to the proposed design, it is possible to ensure the operation of the antenna in the following modes: transparent reflectors, when bi-directional radiation is formed; switching of the lower plate of the metamaterial and the absence of switching of the upper plate, which leads to the formation of directed radiation upward with an increased value of the directional action coefficient; the switching of the upper plate of the metamaterial and the transparent mode of the lower one - the formation of downward-directed radiation. Thus, the antenna operates in three modes with the possibility of fast dynamic rebuilding of modes based on the commutation of pin diodes in the cells of the three-dimensional structure of the metamaterial. We confirmed the results of the operation of the obtained structure by the results of modeling using the Weiland method in electrodynamics, while in order to improve the accuracy of the results, we replaced the pin diodes in the active mode by lumped elements in the form of spice models, and in the off mode - by equivalent circuits. Thus, we obtained the results with the highest accuracy for the proposed antenna design, which illustrate all modes of operation when switching metamaterial plates

**Key words:** active metamaterial, active reflector, reconfigurable antenna

**Acknowledgments:** this research was funded by the grant of the President of the Russian Federation for Young Scientists, the grant number MK-57.2020.9

## References

1. Chaimool S., Hongnara T., Rakluea C., Akkaraekthalin P., Zhao Y. "Design of a PIN diode-based reconfigurable metasurface antenna for beam switching applications", *International Journal of Antennas and Propagation*. 2019. Vol. 2019. Article ID 7216324. 7 p.
2. Ishchenko E.A., Pasternak Yu.G., Sivash M.A., Fedorov S.M. "Investigation of the influence of the metamaterial pyramidal horn integrated into the construction on the directional diagram", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5. pp 107-113.
3. Liu B., Lin G., Cui Y. et al. "An orbital angular momentum (OAM) mode reconfigurable antenna for channel capacity improvement and digital data encoding", *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 9852, 9 p.
4. Mingle S., Hassoun I., Kamali W. "Beam-steering in metamaterials enhancing gain of patch array antenna using phase shifters for 5G application", *IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies*, 2019, pp. 1-4.

Submitted 27.12.2021; revised 15.04.2022

## Information about the authors

**Kirill A. Berdnikov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Evgeniy A. Ishchenko**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Yuriy G. Pasternak**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Leading Engineer of JSC "IRKOS" (21 Zvezdnyy avenue, Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

**Vladimir A. Pendyurin**, General Director, JSC RPE "Automated Communication Systems" (of. 415, 108 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394062, Russia), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Associate Professor, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБНАРУЖЕНИЯ С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИЕЙ РЕШАЮЩЕЙ ФУНКЦИИ

В.С. Костенников, М.Ф. Волобуев, В.Н. Надточий

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** разработана методика расчета вероятностных характеристик обнаружения радиосигнала со случайными начальной фазой и амплитудой. Получены аналитические выражения для вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги при использовании в решающих устройствах кусочно-линейной аппроксимации. Использована кусочно-линейная решающая функция в пороговом устройстве, которая, в отличие от бинарной, наиболее точно подходит для описания реальных переходных процессов компонентов элементной базы, в связи с затруднениями реализации на практике мгновенного изменения устойчивых состояний решающего устройства по ряду причин, к которым относят динамически меняющуюся шумовую обстановку условий работы систем обнаружения и необходимость мгновенной подстройки их параметров. При попадании отсчетов выходного эффекта приемника в зону неопределенности, формируемой кусочно-линейной решающей функцией, данные отсчеты подвергаются дополнительным итерациям, что позволяет в ряде ограничений, накладываемых на условия приема, повысить эффективность обнаружения сигналов. Выполнено моделирование, по результатам которого построены характеристики обнаружения сигнала со случайными начальной фазой и амплитудой при воздействии белого гауссовского шума. Представленные кривые обнаружения позволяют оценить согласованность полученных аналитических выражений и сравнить их с имеющимися в известной литературе

**Ключевые слова:** методика, кусочно-линейная решающая функция, эффективность обнаружения, статистическое моделирование

### Введение

В настоящее время современные отечественные и зарубежные производители радиоэлектронной аппаратуры военного и гражданского назначения обеспечивают повышение эффективности систем обнаружения сигналов при их модернизации, а также за счет применения инновационных технологий и использования высокопроизводительных микропроцессоров. Это обусловлено возрастающими техническими требованиями, предъявляемыми к системам двойного назначения, которые обеспечивают соответствие и превышение характеристик радиотехнических систем при сравнении с мировыми аналогами. Результаты анализа существующих научных работ показывают, что используемый в настоящее время математический аппарат при проектировании и разработке большинства радиотехнических систем не позволяет в полной мере охватить все ограничения и допущения, которые возникают во время работы этих систем в динамически меняющейся шумовой обстановке [1, 2].

Несмотря на появление и внедрение сверхвысокоскоростных микрокомпонентов для повышения эффективности систем обнаружения предлагается разработать теоретический

подход для повышения эффективности современных радиотехнических систем.

Решающие устройства большинства систем обнаружения реализованы на основе операционных усилителей, в технических описаниях которых производители приводят параметры, позволяющие оценить время перехода из одного устойчивого состояния в другое при различных вариантах включения [3]. В связи с этим, решающие функции пороговых устройств при переходе из устойчивых состояний не могут изменяться без наличия временной задержки.

Основная часть разработанных в настоящее время методик и методов обнаружения радиосигналов, обеспечивающих повышение эффективности обнаружения сигналов, имеют общие недостатки, к которым можно отнести время, необходимое для принятия решения и осуществления вычислительных процедур; низкую устойчивость к ошибочным вычислениям; использование аналитических соотношений, абстрагированных от реальных условий приема (бинарные решающие функции пороговых устройств), в полной мере не учитывающие характеристики элементной базы систем обнаружения сигналов.

Поэтому предлагается разработать методику расчета характеристик обнаружения сигналов, учитывающую нелинейность решающей функции порогового устройства.



### Постановка задачи

В классической теории многие задачи обнаружения сигналов на фоне гауссовских шумов при приеме детерминированных сигналов и сигналов со случайными параметрами решены с использованием бинарных решающих функций [1, 2]. В дальнейшем при решении задачи обнаружения будет применена кусочно-линейная аппроксимация (КЛА) решающей функции в пороговых устройствах [4] и рассмотрен прием радиосигнала со случайными начальной фазой и амплитудой [5]. Указанный сигнал выбран как наиболее часто встречающийся на практике и имеет вид

$$s(t, \lambda) = a_0 \phi(t - \tau) \cos(\omega t + \chi(t - \tau) - \varphi_0), \quad (1)$$

$a_0$  – амплитуда сигнала, являющаяся случайной величиной, распределенной по закону Рэлея,  $\phi(t)$  – функция, отображающая закон амплитудной модуляции,  $\omega$  – несущая частота сигнала,  $\chi(t)$  – функция, отображающая закон фазовой модуляции,  $\varphi_0$  – случайная начальная фаза сигнала, равномерно распределенная на интервале  $[-\pi, \pi]$ .

Так как изменение устойчивых состояний решающих устройств мгновенно произойти не может ввиду характеристик элементной базы, то необходимо отойти от идеализированного (бинарного) представления решающего правила и обеспечить описание поведения решающей функции КЛА, вид которой представлен на рис. 1.

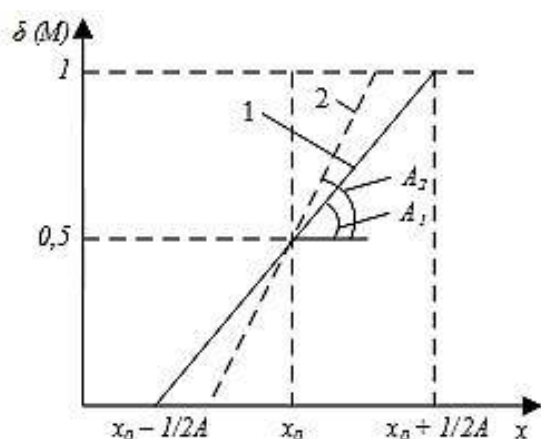


Рис. 1. Вид кусочно-линейной решающей функции

На рис. 1 представлен вид КЛА решающей функции порогового устройства с разными углами наклона  $A_1$  и  $A_2$ .

Выражение для КЛА представлено выражением (2)

$$\delta(x) = \begin{cases} 1, & x > x_0 + \frac{1}{2A} \\ A(x - x_0) + \frac{1}{2}, & x_0 - \frac{1}{2A} < x < x_0 + \frac{1}{2A} \\ 0, & x < x_0 - \frac{1}{2A} \end{cases} \quad (2)$$

Решающая функция выбрана с целью получения окончательных аналитических выражений вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги с ее учетом, а также оценке влияния угла наклона выбранной решающей функции на вероятностные характеристики. В связи с этим в статье разрабатывается методика расчета и оценки характеристик обнаружения сигнала со случайными амплитудой и начальной фазой при использовании КЛА решающей функции порогового устройства.

### Методика расчета вероятности ложной тревоги

Воспользуемся известной формулой для расчета вероятности ложной тревоги [6]

$$P_F = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) P_0(x) dx, \quad (3)$$

где  $\delta(x)$  – функция решающего устройства,  $P_0(x)$  – плотность распределения вероятности значений выходного эффекта приемника при отсутствии полезного сигнала на входе обнаружителя, которая равна

$$P_0(x) = \frac{x}{\sigma_u^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_u^2}\right), \quad (4)$$

где  $\sigma_u^2 = N_0 / 2$  – дисперсия шума приемника.

Подставляя выражения (2) и (4) в (3), запишем интеграл для расчета вероятности ложной тревоги при КЛА решающего устройства

$$P_F = \int_{x_0 - 1/2A}^{x_0 + 1/2A} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_u^2}\right) \left[ A(x - x_0) + \frac{1}{2} \right] dx + \int_{x_0 + 1/2A}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_u^2}\right) dx \quad (5)$$

Выполним замену переменных  $\kappa = \frac{1}{2A\sigma_u}$  и

$\alpha = \frac{x_0}{\sigma_u}$ . Выражение (5) примет вид



$$P_F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha-\kappa}^{\alpha+\kappa} \exp\left(-\frac{(x+\alpha)^2}{2}\right) \left(A\sigma_w x + \frac{1}{2}\right) dx + \\ + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha+\kappa}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

Проинтегрируем полученное выражение, получим

$$P_F = A\sigma_w \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left( \operatorname{erf} \frac{\alpha+\kappa}{\sqrt{2}} - \operatorname{erf} \frac{\alpha-\kappa}{\sqrt{2}} \right) + \\ + \left( \exp\left(-\frac{(\alpha+\kappa)^2}{2}\right) + \exp\left(-\frac{(\alpha-\kappa)^2}{2}\right) \right) \left( \frac{1}{2} - A\sigma_w \kappa \right),$$

где  $\operatorname{erf}(x)$  – интеграл ошибок [7].

При приеме радиосигнала со случайными начальной фазой и амплитудой переменная  $\kappa$  будет принимать значения  $\kappa = (2A\sigma_w)^{-1} \ll 1$ . С учетом этого, выражение для вероятности ложной тревоги можно записать в виде

$$P_F = \beta \int_{\alpha-\kappa}^{\alpha+\kappa} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \beta \sqrt{2} \int_{\frac{\alpha-\kappa}{\sqrt{2}}}^{\frac{\alpha+\kappa}{\sqrt{2}}} \exp(-x^2) dx = \\ = \frac{\beta \sqrt{2}}{2} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{\alpha-\kappa}{\sqrt{2}}}^{\frac{\alpha+\kappa}{\sqrt{2}}} \exp(-x^2) dx,$$

где  $\beta = A \cdot \sigma_w$ .

Для получения окончательного аналитического выражения для вероятности ложной тревоги и с учетом, что  $\kappa = (2A\sigma_w)^{-1} \ll 1$ , найдем отличные от нуля производные. Запишем окончательное выражение для вероятности ложной тревоги

$$P_F = \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right) \cdot \left\{ 1 + \frac{\kappa^2}{2} (\alpha^2 - 1) \right\}. \quad (6)$$

### Методика расчета вероятности правильного обнаружения

Выражение для вероятности правильного обнаружения в теории обнаружения имеет вид

$$P_D = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) P_1(x) dx, \quad (7)$$

где  $P_1(x)$  – плотность распределения вероятности значений выходного эффекта приемника

при наличии полезного сигнала на входе обнаружителя, выражение (8)

$$P_1(x) = \frac{x}{\sigma_x^2 (1+Q)} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2 (1+Q)}\right), \quad (8)$$

где  $Q$  – отношение сигнал/шум.

Подстановкой в выражение (7) КЛА решающей функции (2) и плотности распределения вероятности при наличии сигнала на входе обнаружителя (8) получаем интеграл для вероятности правильного обнаружения

$$P_D = \int_{x_0 - \frac{1}{2A}}^{x_0 + \frac{1}{2A}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_w(1+Q)}} \exp\left(-\frac{(x-aE_1)^2}{2\sigma_w^2(1+Q)}\right) \left(A(x-x_0) + \frac{1}{2}\right) dx + \\ + \int_{x_0 + \frac{1}{2A}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_w(1+Q)}} \exp\left(-\frac{(x-aE_1)^2}{2\sigma_w^2(1+Q)}\right) dx,$$

где  $a$  – амплитуда сигнала,  $E_1$  – энергия сигнала с единичной амплитудой.

Проинтегрируем по  $x$  полученное выражение

$$P_D = \int_{-\kappa}^{\kappa} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x+\alpha-\sqrt{Q})^2}{2}\right) \left(A\sigma_w x + \frac{1}{2}\right) dx + \\ + \int_{\alpha-\sqrt{Q}+\kappa}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx,$$

где  $\kappa = \frac{1}{2A}$ ,  $\alpha = x_0 - aE_1$ .

Произведем следующую замену переменных  $N = \alpha - \sqrt{Q}$ ,  $\sigma_w(1+Q) = \sigma_x$  и запишем окончательное аналитическое выражение для вероятности правильного обнаружения при приеме сигнала со случайными начальной фазой и амплитудой с использованием в решающем устройстве обнаружителя КЛА в виде (9)

$$P_D = \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{N+\kappa}{\sqrt{2}} \right) + \frac{1}{2} (1 - A\sigma_x N) \left( \operatorname{erf} \frac{N+\kappa}{\sqrt{2}} - \operatorname{erf} \frac{N-\kappa}{\sqrt{2}} \right) + \\ + \frac{A\sigma_x}{\sqrt{2\pi}} \left[ \exp\left(-\frac{(N-\kappa)^2}{2}\right) - \exp\left(-\frac{(N+\kappa)^2}{2}\right) \right]. \quad (9)$$

### Оценка эффективности применения кусочно-линейной аппроксимации

Для оценки полученных выражений вероятностных характеристик было проведено ма-

тематическое моделирование в среде Mathcad. Полученные зависимости вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги сопоставлены с известными результатами, представленными в [3]. Так, на рис. 2 представлены зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум, которые построены по выражению (9) (пунктирная кривая – характеристика 2 и штрихпунктирная – характеристика 3), а также по классическому выражению [3], в котором используется бинарная решающая функция (сплошная кривая – характеристика 1).

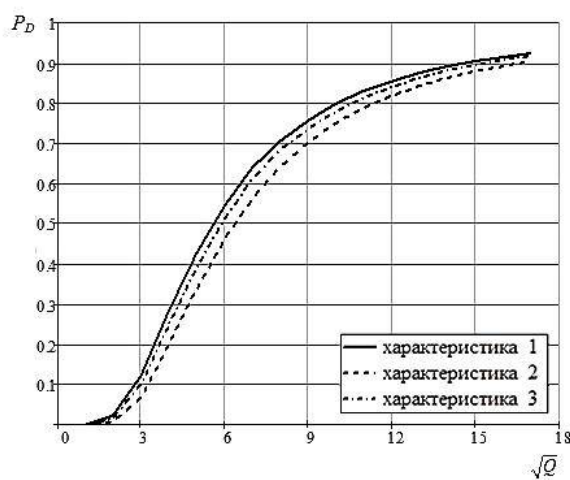


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум

На рис. 3 показана зависимость вероятности ложной тревоги от отношения сигнал/шум, построенная по выражению (6) (пунктирная кривая – характеристика 2 и штрихпунктирная – характеристика 3) и классическому выражению [3] (сплошная кривая – характеристика 1).

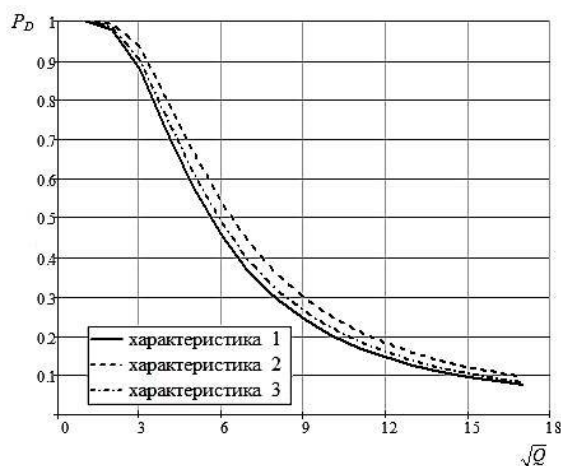


Рис. 3. Зависимость вероятности ложной тревоги от отношения сигнал/шум

На представленных рис. 2 и 3 кривые обнаружения, построенные по разработанным в статье аналитическим выражениям, получены при  $P_F = 10^{-4}$ , двух значениях угла наклона решающей функции:  $55^\circ$  – пунктирная кривая (характеристика 2) и  $75^\circ$  – штрихпунктирная кривая (характеристика 3). При увеличении угла наклона на этих рисунках (переходе решающей функции к классическому бинарному виду) характеристики обнаружения стремятся к оптимальным – это подтверждает правильность рассчитанных выражений для расчета характеристик обнаружения сигналов.

## Заключение

Таким образом, в статье выполнено обобщение теории обнаружения сигналов. Получены новые аналитические выражения для вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги с учетом КЛА решающей функции порогового устройства. Разработана методика оценки и расчёта характеристик обнаружения радиосигналов со случайными начальной фазой и амплитудой при использовании КЛА решающей функции. Представлены результаты моделирования, подтверждающие правильность выполненных расчетов и адекватной реакции на изменения наклона решающей функции порогового устройства.

## Литература

1. Тихонов В.И. Статическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966. 622 с.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
3. MP505 - малошумящий усилитель L-диапазона / АО «НПФ «Микран». URL: <https://www.micran.ru/upload/iblock/72f/MP505.pdf>. (дата обращения 11.01.2022).
4. Рагимов А.Б. Об одном подходе к решению задач оптимального управления на классах кусочно-постоянных, кусочно-линейных и кусочно-заданных функций // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 2 (19). С. 20.
5. Nakhmanson G.S., Kostennikov V.S., Shmoilov A.O. Characteristics of Radio-Signal Detection for the Nonlinear Decision Function of a Threshold Device // Radiophysics and Quantum Electronics. 2020. Vol. 62. № 10. P. 713–719. DOI 10.1007/s11141-020-10017-z.
6. Бердышев В.П. Радиолокационные системы: учебник. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 400 с.
7. Dwight H.R. Tablitsy integralov i drugie matematicheskie formuly [Tables of Integrals and Other Mathematical Data]. New York: the Macmillan Company, 1961. 228 p.

### Информация об авторах

**Костенников Виталий Сергеевич** – младший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54«А»), e-mail: [vitaly.kostennikov@yandex.ru](mailto:vitaly.kostennikov@yandex.ru), тел. 8-950-772-77-61

**Волобуев Михаил Федорович** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54«А»), e-mail: [volmf81@mail.ru](mailto:volmf81@mail.ru), тел. 8-980-347-71-03

**Надточий Виктор Николаевич** – канд. техн. наук, преподаватель кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54«А»), e-mail: [nadtochiy\\_90@mail.ru](mailto:nadtochiy_90@mail.ru), тел. 8-980-246-33-76

## METHODOLOGY FOR ASSESSING THE PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF DETECTION WITH PIECEWISE LINEAR APPROXIMATION OF THE SOLVING FUNCTION

V.S. Kostennikov, M.F. Volobuev, V.N. Nadtochiy

Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

**Abstract:** we developed a method for calculating the probabilistic characteristics of detecting a radio signal with a random initial phase and amplitude. We obtained analytical expressions for the probabilities of correct detection and false alarm when using piecewise linear approximation in solving devices. We used a piecewise linear solving function in a threshold device, which, unlike binary, is most accurately suitable for describing the real transients of the components of the element base, due to the difficulties of implementing in practice instantaneous changes in the stable states of the solver for a number of reasons, which include the dynamically changing noise environment of the operating conditions of detection systems and the need for instant adjustment of their parameters. When the samples of the receiver's output effect fall into the uncertainty zone formed by the piecewise linear solving function, these samples undergo additional iterations, which will allow us, in a number of restrictions imposed on the reception conditions, to increase the efficiency of signal detection. We performed a simulation, based on the results of which the characteristics of detecting a signal with a random initial phase and amplitude under the influence of white Gaussian noise are constructed. The presented detection curves allow us to evaluate the consistency of the obtained analytical expressions and compare them with those available in the known literature

**Key words:** methodology, piecewise linear solving function, detection efficiency, statistical modeling

### References

1. Tikhonov V.I. “Static radio engineering” (“Sticheskaya radiotekhnika”), Moscow: Sovetskoe radio, 1966, 622 p.
2. Levin B.R. “Theoretical foundations of statistical radio engineering” (“Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki”), Moscow: Radio i svyaz', 1989, 656 p.
3. MP505 - L-band low-noise amplifier, JSC "NPF "Mikran", available at: <https://www.micran.ru/upload/iblock/72f/MP505.pdf>. (date of access 11.01.2022).
4. Ragimov A.B. “On one approach to solving optimal control problems on classes of piecewise-constant, piecewise-linear and piecewise-given functions”, Tomsk State University Bulletin (Vestnik Tomskogo gosuniversiteta), 2012, no. 2 (19), pp. 20.
5. Nakhmanson G.S., Kostennikov V.S., Shmoilov A.O. “Characteristics of radio-signal detection for the nonlinear decision function of a threshold device, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2020, vol. 62, no. 10, pp. 713–719. DOI 10.1007/s11141-020-10017-z.
6. Berdyshev V.P. “Radio location systems” (“Radiolokatsionnye sistemy”), Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011, 400 p.
7. Dwight H.R. “Tables of integrals and other mathematical data”, New York: the Macmillan Company, 1961, 228 p.

Submitted 18.01.2022; revised 19.04.2022

### Information about the authors

**Vitaliy S. Kostennikov**, Junior Researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54A Starykh Bolsheviks st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: [vitaly.kostennikov@yandex.ru](mailto:vitaly.kostennikov@yandex.ru), tel.: +7-950-772-77-61

**Mikhail F. Volobuev**, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54A Starykh Bolsheviks st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: [volmf81@mail.ru](mailto:volmf81@mail.ru), tel.: +7-980-347-71-03

**Viktor N. Nadtochiy**, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54A Starykh Bolsheviks st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: [nadtochiy\\_90@mail.ru](mailto:nadtochiy_90@mail.ru), tel.: +7-980-246-33-76

## РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Д.О. Лялин, Е.Д. Алперин

Воронежский государственный технический университет г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** приведен вариант реализации поведенческой модели сложно-функциональных блоков на языке Verilog-A. Разработаны поведенческие модели источника опорного напряжения, усилителя сигнала ошибки, источника стабильного тока. При помощи данных сложно-функциональных блоков была разработана поведенческая модель линейного стабилизатора напряжения с требуемыми параметрами. Приведены листинги разработанных поведенческих моделей, тестовые схемы для проверки корректной работы, показаны графики зависимостей входных и выходных сигналов. Одним из неоспоримых достоинств поведенческих моделей является минимальное время моделирования, которое на несколько порядков меньше времени моделирования на транзисторном уровне. Для ускорения времени проектирования имеет смысл создать описание модели на Verilog-A для дальнейшего использования в других устройствах при проектировании микросхем. С помощью этого языка описания аппаратуры можно реализовать в цифровом виде моделирование аналогового устройства. При этом можно легко изменять параметры под необходимые в конкретном устройстве. Представлены результаты моделирования сложно-функциональных блоков и линейного стабилизатора напряжения в статическом режиме. Сопоставлены результаты моделирования сложно-функциональных блоков и линейного стабилизатора напряжения с необходимыми параметрами

**Ключевые слова:** сложно-функциональный блок, поведенческая модель, Verilog-A, линейный стабилизатор напряжения

### Введение

Существуют различные классы устройств, в которых используются сложно-функциональные (СФ) блоки. Для разработки таких блоков используют языки описания аппаратуры, например Verilog-A. Одним из устройств, который можно создать из СФ блоков, является линейный стабилизатор напряжения. Типовая схема линейного стабилизатора напряжения включает в себя следующие блоки: источник опорного напряжения, усилитель сигнала ошибки, источники тока. СФ блоки создаются с помощью поведенческого моделирования на языке Verilog-A. Далее использовать такой СФ блок можно при разработке любых устройств, быстро изменяя параметры под необходимые.

Поведенческие модели – это такие модели, которые имитируют работу необходимого устройства, описывают функционал электронного прибора и реализуют соответствие между входным и выходным сигналом, при этом используется логическое описание работы микросхемы, а не транзисторная логика работы устройства [1]. Структура модели обусловлена основным ее применением – предварительным моделированием работы устройства для анали-

за разработанной архитектуры и принятых принципов работы.

Актуальность заключается в том, что для определенного класса устройств имеет смысл разработать СФ блоки один раз, чтобы в дальнейшем использовать их для разработки других схем. Описание схемы на синтезируемом подмножестве языков Verilog, VHDL и других позволяет автоматизировать все последующие этапы проектирования – разработку на уровне регистровых передач и разработку топологии схемы. Другой положительный эффект применения языков описания аппаратуры в маршрутах проектирования БИС – существенное уменьшение времени моделирования. Это позволяет сократить длительность этапа разработки ИМС и ускорить выпуск продукции на рынок.

На примере линейного стабилизатора напряжения было выделено три функциональных блока [2]. Рассмотрим разработку каждого из них. В соответствии с техническим заданием, модель стабилизатора должна обладать следующими характеристиками:

- диапазон входного напряжения от 1,7 В до 5,5 В;
- выходное напряжение равно 2,5 В;
- выходной ток равен 150 мА;
- опорное напряжение равно 1,2 В;
- падение напряжения равно 30 мВ;



- напряжения включения от 1,7 В;
- ток включения 20 нА;
- рабочая температура от -55 °С до 125 °С.

### Разработка поведенческой модели источника опорного напряжения

Была создана модель источника опорного напряжения. Он формирует выходное напряжение, которое не зависит от напряжения источника питания и от температуры. Для этого в САПР Cadence Virtuoso создадим Verilog – А описание. Заданы необходимые входы и выходы источника опорного напряжения: выход, включение, земля, питание, температура [3]. Определены параметры для работы: напряжение включения, напряжение питания, ток потребления, выходное напряжение, выходной ток. Далее описан алгоритм работы источника опорного напряжения, который заключается в том, что его выходное напряжение не зависит от напряжения источника питания и температуры. Описано влияние напряжения включения и температуры на его работу. Поведенческая модель разработана, далее был создан символ модели и проведена проверка правильности работы при помощи тестовой схемы. Листинг программы приведен на рис. 1.

```

1 // VerilogA for Diploim, Bandgap, verilogA
2
3 include "constants.vams"
4 include "disciplines.vams"
5
6 module Bandgap(vcc, vbg, temp, gnd, en);
7 inout vcc, vbg, temp, gnd, en;
8 electrical vcc, vbg, temp, gnd, en;
9 parameter real vbg_nom = 1.204;
10 parameter real ioc_nom = 10.0e-6;
11 parameter real enth = 1.7;
12 parameter real vceht = 1.7;
13 real tempC_swp;
14 real vcc_app1;
15 real vbg_out;
16 real iout;
17 analog begin
18   if ((V(en,gnd) < enth) || (V(vcc,gnd) < vceht)) begin
19     vbg_out = 0;
20     iout = 0;
21   end
22   else begin
23     tempC_swp = (V(temp, gnd) - 27.0)/27.0;
24     vcc_app1 = (V(vcc,gnd) - 5.0)/5.0;
25     iout = (ioc_nom - 2.78e-8*tempC_swp)*
26       (1.0 + (0.01*(V(vcc,gnd) - 2.0)));
27     vbg_out = vbg_nom - 0.0008 +
28       1.1e-5*vcc_app1 - 0.5e-5*tempC_swp*tempC_swp;
29   end
30   V(vbg,gnd) <= vbg_out;
31   I(vcc,gnd) <= iout;
32 end
33
34 end
35 end
36
37 endmodule
38

```

Рис. 1. Листинг модели ИОН на языке Verilog-A

Тестовая схема для проверки работы модели источника опорного напряжения показана на рис. 2. Было произведено моделирование и рассмотрено влияние сигнала на входе включения на выходной сигнал. Результаты моделирования показаны на рис. 3.

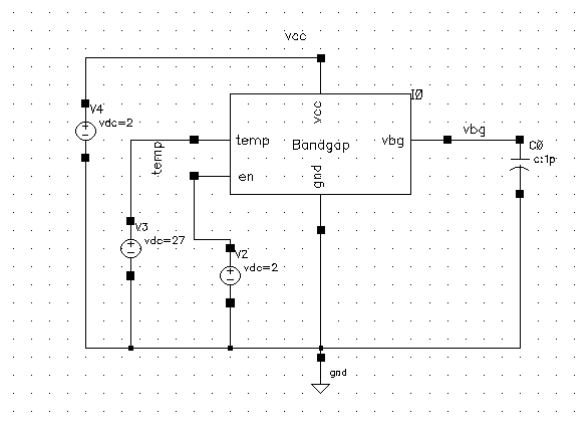


Рис. 2. Тестовая схема для проверки работы ИОН

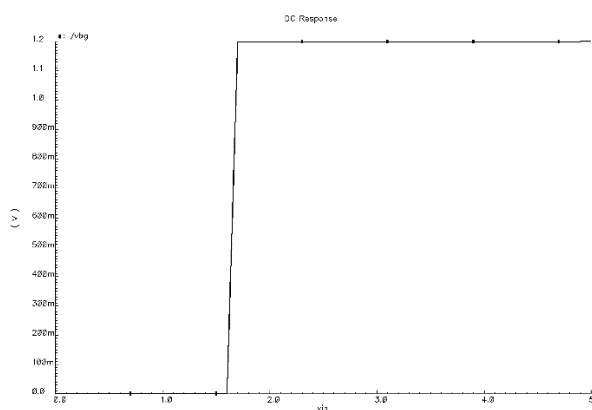


Рис. 3. Выходное напряжение поведенческой модели ИОН в зависимости от входного напряжения

Таким образом, по результатам моделирования видно, что модель работает как требуется источнику опорного напряжения, следовательно, её можно использовать при разработке линейного стабилизатора напряжения.

### Разработка поведенческой модели источника тока

Далее была создана модель источника тока. Для этого в САПР Cadence Virtuoso было разработано Verilog – А описание. Заданы необходимые входы и выходы источника стабильного тока (ИСТ): включение, земля, питание. Определены параметры для работы: напряжение включения, напряжение питания, ток. После описан алгоритм работы ИСТ, который заключается в том, что ток не зависит от напряжения и сопротивления нагрузки. Далее описано влияние напряжения включения и питания на его работу. Поведенческая модель готова, далее был создан символ модели и проведена проверка правильности работы при помощи тестовой схемы. Листинг программы приведен на рис. 4.

```

1 // VerilogA for Diplo, icc, verilogs
2
3 `include "constants.vams"
4 `include "disciplines.vams"
5
6 `define undervoltage 0
7 `define disable 1
8 `define enable 2
9
10 module icc(vcc, en, gnd);
11   inout vcc, en, gnd;
12   electrical vcc, en, gnd;
13   parameter real vth = 1.7;
14   parameter real enth = 1.7;
15   integer sw_state;
16   real vccur, encur;
17   analog begin
18     if ((V(vcc,gnd) - vth) < 0)
19       vcccur=0;
20     else begin
21       if ((V(en,gnd) - vth) < 0)
22         vcccur=20n;
23       end
24       if ((V(en,gnd) - enth) < 0)
25         encur=0;
26       else encur=20n;
27     end
28     I(en,gnd) <+ encur;
29     I(vcc,gnd) <+ vcccur;
30   end
31 endmodule
32
33

```

Рис. 4. Листинг модели ИСТ на языке Verilog - А

Тестовая схема для проверки работы модели источника стабильного тока (ИСТ) показана на рис. 5. Были поданы прямоугольные импульсы на вход включения и рассмотрен полученный ток. Результаты моделирования показаны на рис. 6.

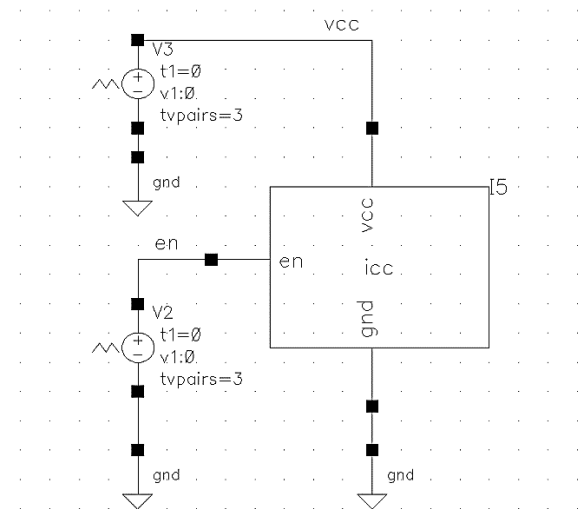


Рис. 5. Тестовая схема для проверки работы модели ИСТ

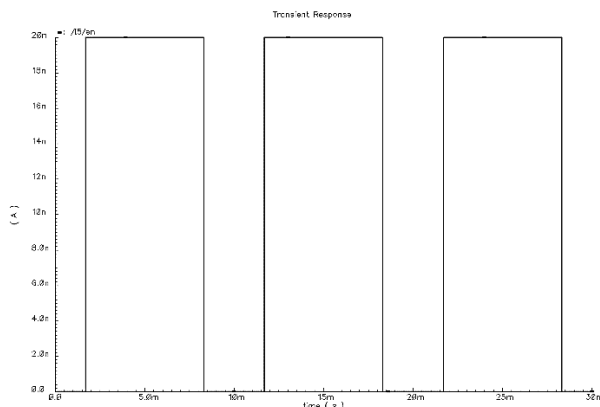


Рис. 6. Номинальный ток на входе включения

Модель работает верно, данный СФ блок можно использовать для разработки устройств, в том числе для стабилизатора напряжения.

## Разработка поведенческой модели усилителя сигнала ошибки

Далее была создана поведенческая модель усилителя сигнала ошибки. Для этого в программе Cadence было создано Verilog – А описание. Заданы необходимые входы и выходы операционного усилителя: плюсовой вход, минусовой вход, выход, включение, земля, питание. Определены параметры для работы: коэффициент усиления, внутреннее сопротивление, входное сопротивление, величина обходного конденсатора, напряжение включения. После описан алгоритм работы операционного усилителя, то есть, реализован главный принцип его работы: выход операционного усилителя стремится к тому, чтобы разность напряжения на его входах была равна нулю. Поведенческая модель готова, далее создан символ модели и проведена правильность работы при помощи тестовой схемы.

Листинг модели на Verilog - А представлен на рис. 7. Тестовая схема для проверки работы модели операционного усилителя на рис. 8. Результаты моделирования частотных характеристик покажем на рис. 9.

```

1 // VerilogA for Diplo, VerilogA, verilogs
2
3 `include "constants.vams"
4 `include "disciplines.vams"
5
6 module Opamp (inm, inp, out, en, gnd, vcc);
7   inout inm, inp, out, en, gnd, vcc;
8   electrical inm, inp, out, en, gnd, vcc;
9   parameter real gain = 250000;
10  parameter real rgm = 2500;
11  parameter real cc = 0.0000000000030;
12  parameter real rin = 2000000;
13  parameter real enth = 1.7;
14  electrical vin, vo;
15  analog begin
16    I(vin, vo) <+ V(vin, vo)/rgm;
17    I(vo, gnd) <+ ddt(cc*V(vo, gnd));
18
19    if (V(en,gnd) < enth)
20      V(vin, gnd) <+ 0;
21    else
22      V(vin, gnd) <+ gain*V(inp, inm);
23
24    if (V(vo,gnd) < 0)
25      V(out, gnd) <+ 0;
26    else
27      V(out, gnd) <+ V(vcc,gnd);
28
29    if (V(vcc,gnd) > V(vo,gnd))
30      V(out, gnd) <+ V(vo, gnd);
31    else V(out, gnd) <+ V(vcc,gnd);
32
33  end
34 endmodule
35
36
37
38
39

```

Рис. 7. Листинг модели операционного усилителя на языке Verilog-A

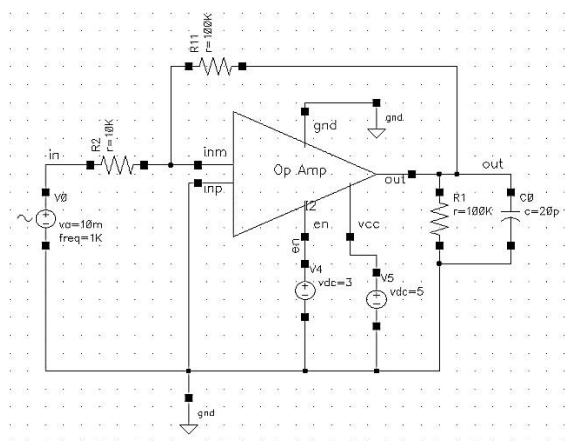


Рис. 8. Тестовая схема для проверки работы операционного усилителя

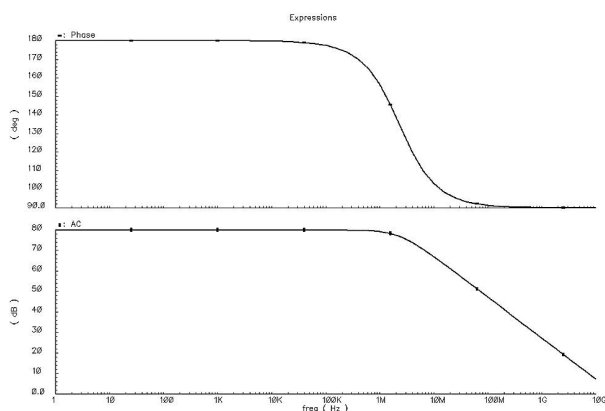


Рис. 9. Частотные характеристики поведенческой модели операционного усилителя

Переходная реакция операционного усилителя на синусоидальный вход, проверяющий функциональность модели, показана на рис. 10.

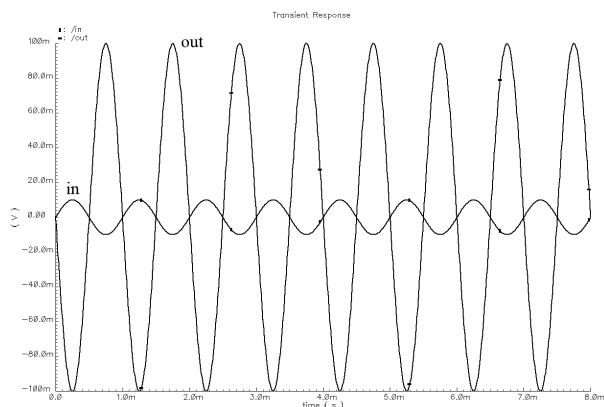


Рис. 10. Временные характеристики поведенческой модели операционного усилителя

После проверки модели можно сделать вывод, что СФ-блок разработан верно. Его можно использовать для различных моделей схем.

## Разработка поведенческой модели линейного стабилизатора напряжения

На основе созданных ранее модулей необходимо собрать схему поведенческой модели, соберем схему в соответствии с базовой структурой стабилизатора напряжения. Чтобы стабилизатор был с малым падением напряжения, необходимо взять мощный проходной NMOS транзистор. Для устранения шумов и плавной работы схемы добавим RC фильтра после каждого блока.

Поведенческая модель линейного стабилизатора напряжения, собранная в программе Cadence Virtuoso Schematic, изображена на рис. 11.

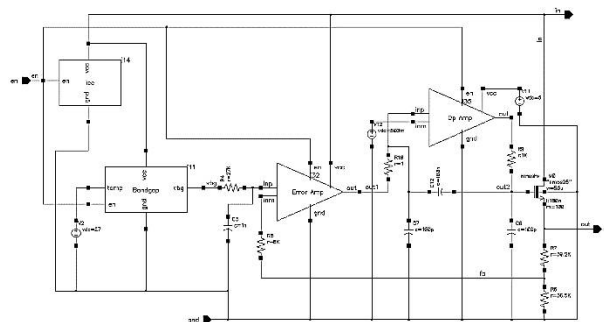


Рис. 11. Поведенческая модель линейного стабилизатора напряжения в программе Cadence Virtuoso Schematic

Произведём исследование параметров поведенческой модели в Cadence. Создадим символ (рис. 12) для нашей модели для дальнейшего использования в тестовой схеме.

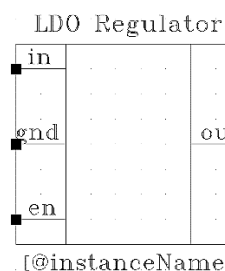


Рис. 12. Символ поведенческой модели

Символ имеет 4 вывода: для входного сигнала, для подключения к земле, для сигнала включения и для выходного сигнала.

Далее создадим тестовую схему с необходимыми источниками входных сигналов и подключенной нагрузкой (рис. 13).

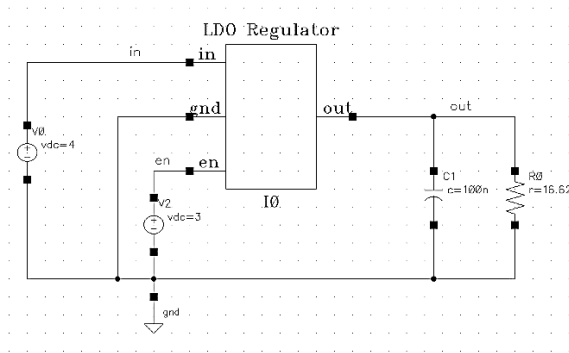


Рис. 13. Тестовая схема для проверки модели стабилизатора

У линейного стабилизатора напряжения существует множество параметров. Но одним из самых главных является падение напряжения (Dropout Voltage). Проведём измерение данного параметра с помощью DC анализа. Результаты моделирования показаны на рис. 14.

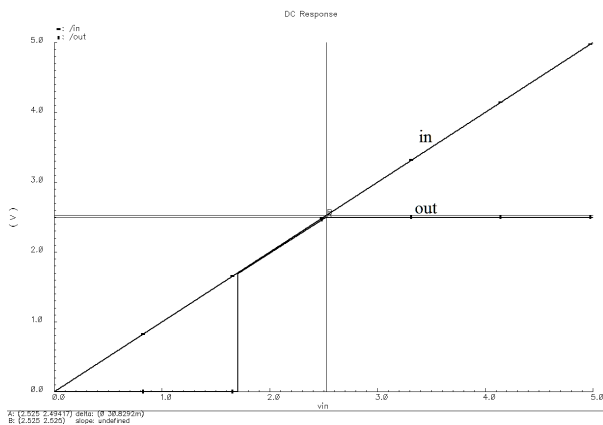


Рис. 14. Падение напряжение LDO стабилизатора

По рис. 14 можно заметить, что падение напряжения равно 30.8 мВ, что соответствует техническому заданию.

## Заключение

Таким образом, по полученным результатам видно, что все необходимые параметры удовлетворяют техническому заданию, поведенческая модель стабилизатора работает верно. Данную поведенческую модель теперь можно использовать для разработки аналогичных стабилизаторов напряжения с необходимыми параметрами.

В модели можно изменять параметры её блоков, тем самым можно быстро провести анализ необходимого стабилизатора. Так как используется модульный принцип построения, то в соответствии со структурной схемой анализируемого устройства можно изменять поведенческую модель, дополнять требуемыми модулями для более сложных устройств либо удалять лишние модули для более простых устройств.

В настоящее время поведенческие модели нашли широкое применение при проектировании различных устройств, микросхем, систем на кристалле. Они используются в научно-исследовательских институтах, на предприятиях по разработке радиоэлектронной аппаратуры, как начальный этап проектирования без сложного расчета для анализа поведения требуемого устройства.

## Литература

1. Школин А.Н., Дракин А.Ю. Разработка подходов к автопостроению поведенческих моделей интегральных микросхем регуляторов напряжения // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2018. С. 104-108.
2. Малаханов А.А. Поведенческая модель линейного стабилизатора напряжения на языке spice// САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019. С. 182-186.
3. Дракин А.Ю., Школин А.Н., Пугачев А.А. Использование имитационных моделей при контроле параметров интегральных микросхем // Инженерный вестник Дона. 2019. № 3. 16 с.

Поступила 05.03.2022; принята к публикации 19.04.2022

## Информация об авторах

**Лялин Денис Олегович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(920)466-97-55, e-mail: lyalin.denis@mail.ru  
**Алперин Евгений Данилович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(952)106-86-61, e-mail: aed@yandex.ru



## DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL BLOCKS FOR LINEAR VOLTAGE STABILIZER

D.O. Lyalin, E.D. Alperin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article presents a variant of the implementation of the behavioral model of complex-functional blocks in the Verilog-A language. We developed behavioral models of a reference voltage source, an error signal amplifier, and a stable current source. Using these complex functional blocks, we developed a behavioral model of a linear voltage stabilizer with the required parameters. The article contains listings of the developed behavioral models, test schemes for checking the correct operation, shows graphs of input and output signals dependencies. One of the indisputable advantages of behavioral models is the minimum simulation time, which is several orders of magnitude less than the simulation time at the transistor level. To speed up design time, it makes sense to create a model description in Verilog-A for further use in other devices when designing microcircuits. With this hardware description language, a simulation of an analog device can be realized digitally. At the same time, you can easily change the parameters as needed in a particular device. The article presents the results of modeling complex-functional blocks and a linear voltage regulator in a static mode. The results of modeling complex-functional blocks and a linear voltage stabilizer are compared with the necessary parameters

**Key words:** complex functional block, behavioral model, Verilog-A, linear voltage stabilizer

### References

1. Shkolin A.N., Drakin A.Yu. "Development of approaches to auto-construction of behavioral models of integrated circuits for voltage regulators", *Proc. of II Intern. Scientific-Practical. Conf.: CAD and Modeling in Modern Electronics (SAPR i modelirovanie v sovremennoy elektronike)*, Bryansk State Technical University, 2018, pp. 104-108.
2. Malakhanov A.A. "Behavioral model of a linear voltage regulator in the spice language *Proc. of III Intern. Scientific-Practical. Conf.: CAD and Modeling in Modern Electronics (SAPR i modelirovanie v sovremennoy elektronike)*", Bryansk State Technical University, 2019, pp. 182-186.
3. Drakin A.Yu., Shkolin A.N., Pugachev A.A. "The use of simulation models for controlling the parameters of integrated circuits", *Engineering Bulletin of the Don (Inzhenernyy vestnik Dona)*, 2019, no. 3, 16 p.

Submitted 05.03.2022; revised 19.04.2022

### Information about the authors

**Denis O. Lyalin**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(920)466-97-55, e-mail: lyalin.denis@mail.ru

**Evgeniy D. Alperin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(952)106-86-61, e-mail: aed@yandex.ru

## ЗЕРКАЛЬНАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ SIW ТЕХНОЛОГИИ

И.А. Баранников<sup>1</sup>, К.А. Бердников<sup>1</sup>, С.И. Деревянкин<sup>1</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, К.В. Смушева<sup>2</sup>,  
С.М. Фёдоров<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается зеркальная антенна, разработанная на основе технологии «интегрированный в диэлектрическую подложку волновод» (SIW). Для исследования полных характеристик была сформирована электродинамическая модель рупорного излучателя с трапецевидной диэлектрической линзой для улучшения характеристик излучателя, а также определения диапазона рабочих частот. Полученные результаты моделирования облучателя показали, что SIW антенны обладают высокими качественными показателями, а также способны обеспечить высокую эффективность работы в широком диапазоне частот. На основе конструкции рупорной SIW антенны была сформирована зеркальная SIW антенна с двумя типами конструкции: моноплатная структура, когда антенна и рефлектор полностью расположены на единой диэлектрической подложке прямоугольной формы, а также конструкция с минимальным использованием диэлектрика. Полученные конструкции исследовались с использованием электродинамического моделирования, которое показало, что SIW зеркальные антенны обладают высокими качественными характеристиками – высоким коэффициентом направленного действия (КНД), коэффициентом полезного действия (КПД), а также обладают узким направленным лучом главного лепестка диаграммы направленности. На основании полученных конструкций сделаны выводы о возможности применения технологии SIW в зеркальных антеннах миллиметрового диапазона радиоволн

**Ключевые слова:** SIW рупорная антенна, зеркальная антенна, миллиметровый диапазон волн

## Введение

SIW антенны имеют большие перспективы для связи в миллиметровых диапазонах радиоволн. Благодаря формированию антенн в структурах диэлектрика удастся повысить эффективность передачи электромагнитных волн, уменьшить потери, а также передавать волны не по поверхностям проводящих рисунков, а именно в самих пластинах диэлектрика. Помимо этого, благодаря созданию диэлектрических материалов с малыми потерями формирование планарных антенн набирает все большую популярность.

Эффективность использования SIW рупорных антенн показана во многих научных работах. В работе [1] рассматривается рупорная SIW антенна для частот V-диапазона (IEEE). Полученные результаты показывают, что рупорные SIW антенны обладают высокими уровнями КПД и КНД, при этом особый акцент делается на то, что для оптимизации характеристик распространения электромагнитных волн требуется установка на выходе SIW антенны диэлектрической линзы.

Акцент на выбор типа линзы приводится авторами работы [2]. В качестве вариантов приводятся два типа диэлектрических линз: прямоугольная и эллиптическая. Полученные в процессе исследования результаты показывают, что использование прямоугольной линзы имеет меньшую эффективность по сравнению с эллиптической. Помимо этого, показана эффективность использования методов электродинамического моделирования для получения результатов и характеристик антенн в SIW структурах.

Другим примером конструкции SIW рупорной антенны является работа [3]. Авторы предлагают новую конструкцию линзы, которая сформирована на основе ряда диполей, которые формируются на основе металлизированных отверстий, которые устанавливаются на выходе раскрыва рупора. Благодаря использованию полученной линзы возможно обеспечить уменьшение уровня боковых лепестков и повысить направленные свойства антенны.

Одной из важных задач в формировании SIW антенн является исследование зеркальных антенн, пример которой приводится в работе [4]. Полученные результаты показывают, что возможно сформировать антенну с высоким уровнем КНД, при этом обеспечивается достижение характеристик схожими с зеркальными

антеннами. Недостатком же предложенной авторами конструкции является то, что рефлектор формируется на основе полностью металлизированного отверстия в диэлектрическом материале.

В данной работе предлагается конструкция зеркальной антенны на основе SIW технологии, которая предназначена для связи в миллиметровом диапазоне частот.

### Конструкция SIW рупорного облучателя

В качестве излучателя была выбрана конструкция SIW рупорной антенны, которая базируется на диэлектрике Rogers TMM 3 ( $\epsilon = 3.45$ ,  $\tan \delta = 0.002$ ). Модель антенны приводится на рис. 1.

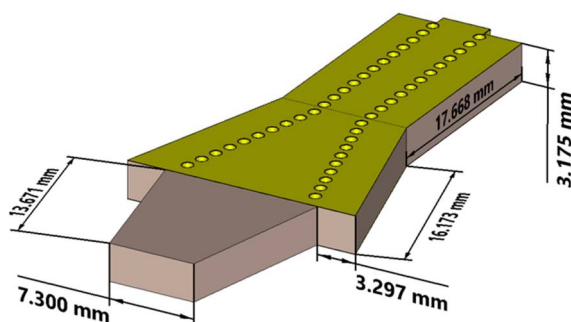


Рис. 1. Модель исследуемого рупорного облучателя с трапециевидной линзой

Как видно, разработанная антенна обладает малой толщиной, а канал распространения электромагнитных волн формируется на основе металлизированных отверстий диаметром 1 мм. Определим основные характеристики антенны на основе электродинамического моделирования. Так, график  $S_{11}$ -параметров приводится на рис. 2.

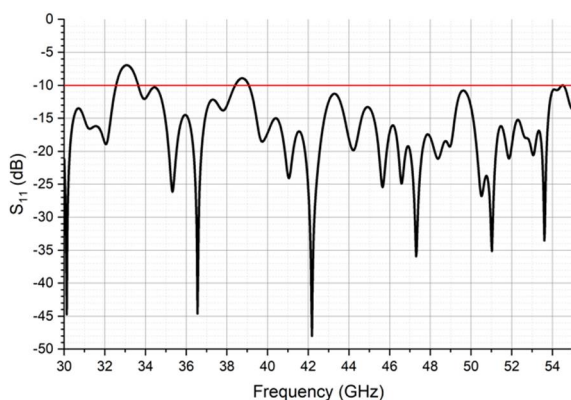


Рис. 2. Зависимость  $S_{11}$  параметров для разработанной антенны

На основании полученного графика возможно определить диапазон рабочих частот антенны по уровню -10 дБ (КСВН=2). Так, видно, что рабочий диапазон частот антенны составляет от 33.64 до 38.42 ГГц и 39-54.54 ГГц. Таким образом, антенна обеспечивает стабильное функционирование в широком диапазоне частот, при этом сохраняется высокий коэффициент полезного действия (более 80%), а также высокие направленные свойства. На рис. 3 приводится типовая диаграмма направленности антенны для исследуемого диапазона частот (во всем диапазоне рабочих частот КНД не опускается ниже 10 дБ, уровень боковых лепестков не более -10 дБ).

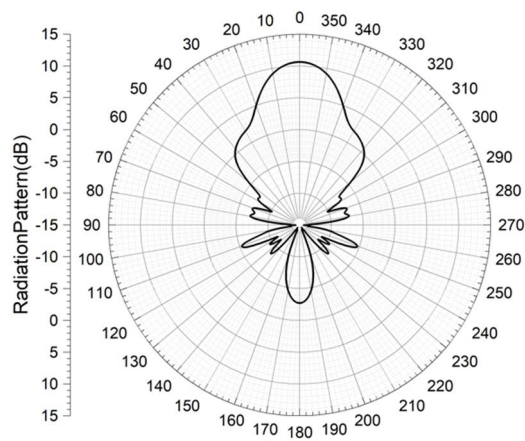


Рис. 3. Типовая диаграмма направленности разработанной антенны в горизонтальной плоскости

Как видно, диаграмма направленности близка по форме к характеристике для пирамидального рупора, при этом ширина лепестка составляет от 25 до 30 градусов. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что характеристики полученной антенны близки к аналогичным Н-секториальным рупорам, однако благодаря применению SIW технологии удается достичь малых размеров конструкции, а также простоты интеграции в печатные платы. Рассмотрим возможность формирования зеркальной антенны на основе разработанной SIW рупорной антенны.

### Конструкция SIW зеркальной антенны

В качестве исследуемой зеркальной антенны были разработаны два типа конструкции антенны – с полным заполнением конструкции диэлектриком; с использованием минимального числа диэлектрической среды – рис. 4.

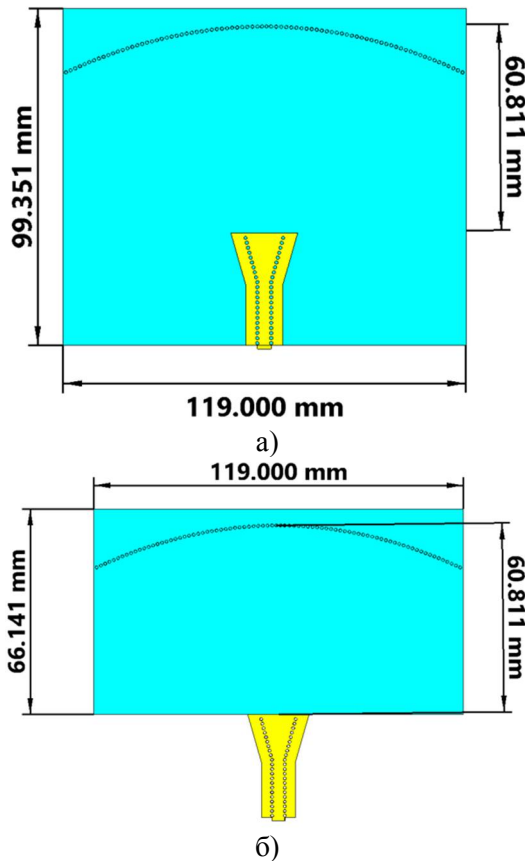


Рис. 4. Разработанные конструкции зеркальной антенны:  
а) моноплатная конструкция;  
б) минимизация использования диэлектрика

На основании полученной конструкции производилось моделирование основных характеристик излучателя. Для достижения максимального уровня КНД производилась оптимизация параметров параболического рефлектора и фокусировки электромагнитных волн. На основе проведенного электродинамического моделирования были получены основные параметры антенны. Так, на рис. 5 приводятся диаграммы направленности для двух типов конструкции.

Полученные результаты моделирования показали, что использование моноплатной структуры позволяет упростить конструкцию рефлекторной антенны на стадии производства, однако из-за увеличения пространства, которое электромагнитные волны проходят в диэлектрической подложке, наблюдается снижение КПД на 5-8% в рабочем диапазоне частот. Все полученные результаты моделирования разработанной конструкции зеркальной SIW антенны приводятся в табл. 1.

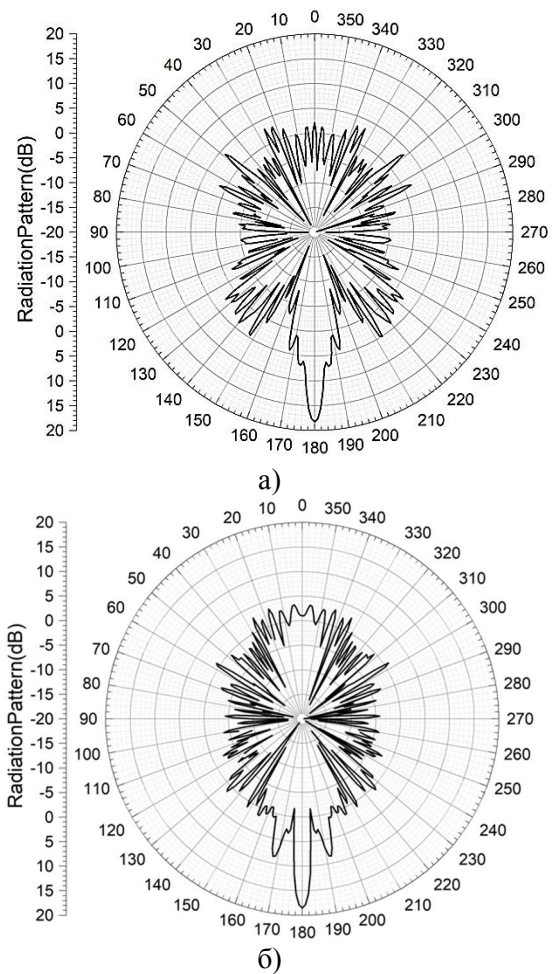


Рис. 5. Картины диаграмм направленности для зеркальной антенны: а) моноплатная конструкция; б) минимизация использования диэлектрика

Таблица 1  
Характеристики диаграмм направленности  
зеркальной SIW антенны

Характеристика	Моноплатная структура	Минимизация диэлектрика
КНД (диап. знач.), дБ	17.5-18.2	17.3-18.5
КНД мин (f), дБ	17.5 (50 ГГц)	17.3 (50 ГГц)
КНД макс (f), дБ	18.2 (35 ГГц)	18.5 (35 ГГц)
КПД мин, %	75	80
ПЗО (35 ГГц)	16.3	17.5
Ширина гл. лепестка (35 ГГц), °	4.2	4.1
УБЛ (35 ГГц), дБ	-11	-10

Полученные результаты показывают, что использование SIW зеркальных антенн позволяет сформировать узконаправленную диаграмму направленности с высоким уровнем КНД и высоким КПД антенны в широком диапазоне рабочих частот.



## Заключение

Предложенная в данной работе зеркальная SIW антенна показывает высокие перспективы использования антенн, изготовленных по такой технологии в миллиметровом диапазоне волн. Как показали результаты электродинамического моделирования, SIW излучатели могут использоваться как отдельные излучатели – рупорные антенны, так и в составе зеркальных антенн.

Благодаря характеристикам современных диэлектрических подложек удается обеспечить широкий рабочий диапазон частот работы антенны с малыми потерями.

## Литература

1. A 60-GHz CPW-Fed High-Gain and Broadband Integrated Horn Antenna / B. Pan, Y. Li, G.E. Ponchak, J. Papapolymerou, M.M. Tentzeris // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57. No. 4. Pp. 1050-1056.
2. Dielectric Loaded Substrate Integrated Waveguide (SIW) H-Plane Horn Antennas/ H. Wang, D. Fang, B. Zhang, W. Che // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010. Vol. 58. No. 3. Pp. 640-647.
3. Li Y., Wang J. Millimeter-wave wideband substrate integrated waveguide horn antenna loaded with dipole array // 2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition. 2017. Pp. 12-13.
4. A high gain printed antenna with parabolic metal grid reflector based on SIW technology/ W. Jun, L. Shu, A. Denisov, L. Lu // 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 2018. Pp. 523-524.

Поступила 27.12.2021; принята к публикации 19.04.2022

## Информация об авторах

**Баранников Илья Андреевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>

**Бердников Кирилл Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Деревянкин Сергей Игоревич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); тел. +7(473)243-77-29, e-mail: derevyankin\_sergej@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8883-8446>.

**Ищенко Евгений Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Смусева Ксения Владимировна** – студент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: smusevaz@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8515-2841>

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## REFLECTOR ANTENNA BASED ON SIW TECHNOLOGY

I.A. Barannikov<sup>1</sup>, K.A. Berdnikov<sup>1</sup>, S.I. Derevyankin<sup>1</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, K.V. Smuseva<sup>2</sup>, S.M. Fyedorov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State University, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article discusses a reflector antenna developed on the basis of the "substrate integrated waveguide" (SIW) technology. We formed, an electrodynamic model of a horn radiator with a trapezoidal dielectric lens to improve the characteristics of the radiator to study the full characteristics as well as to determine the range of operating frequencies. The obtained results of modeling the emitter showed that SIW antennas have high quality indicators, as well as ways to ensure high efficiency in a wide frequency range. On the basis of the design of the horn SIW antenna, we formed a reflector SIW antenna with two types of design: a mono-board structure, when the antenna and reflector are located on a single dielectric rectangular substrate, and also a design with minimal use of dielectric. The resulting designs were investigated using electrodynamic modeling, which showed that SIW reflector antennas have high quality characteristics - high directivity, total efficiency, and also have a narrow directional beam of the main lobe of the directional pattern. On the basis of the obtained structures, we made conclusions about the possibility of using the SIW technology in reflector antennas of the millimeter range of radio waves

**Key words:** SIW horn antenna, reflector antenna, millimeter wave

# References

1. Pan B., Li Y., Ponchak G.E., Papapolymerou J., Tentzeris M.M. "A 60-GHz CPW-fed high-gain and broadband integrated horn antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, vol. 57, no. 4, pp. 1050-1056.
2. Wang H., Fang D., Zhang B., Che W. "Dielectric loaded substrate integrated waveguide (SIW) H-plane horn antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010. vol. 58, no. 3, pp. 640-647.
3. Li Y., Wang J., Wang J. "Millimeter-wave wideband substrate integrated waveguide horn antenna loaded with dipole array", *2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition*, 2017, pp. 12-13.
4. Jun W., Shu L., Denisov A., Lu L. "A high gain printed antenna with parabolic metal grid reflector based on SIW technology", *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2018, pp. 523-524.

Submitted 27.12.2021; revised 19.04.2022

# Information about the authors

**Il'ya A. Barannikov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>

**Kirill A. Berdnikov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Sergey I. Derevyankin**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: derevyankin\_sergej@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8883-8446>.

**Evgeniy A. Ishchenko**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Kseniya V. Smuseva**, student, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: smusevaz@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8515-2841>

**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Associate Professor, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## АВТОНОМНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФ НА БАЗЕ ОДНОПЛАТНОГО КОМПЬЮТЕРА NVIDIA JETSON

А.Б. Степанов<sup>1</sup>, Д.В. Козлов<sup>2</sup>, А.В. Запайщиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

**Аннотация:** данная работа посвящена реализации автономного портативного электроэнцефалографа на базе одноплатного компьютера Nvidia Jetson Nano и аналогово-цифрового преобразователя ADS1299 фирмы Texas Instruments. Электроэнцефалограф позволяет в реальном времени регистрировать и обрабатывать 8 физических каналов с частотами дискретизации от 250 Гц до 16 кГц. Предложена концепция данного устройства, которое состоит из 3 основных функциональных блоков: блока регистрации данных, блока обработки данных и блока визуализации данных. Разработан модифицированный алгоритм работы портативного электроэнцефалографа на основе расчёта вейвлет-коэффициентов и периодограмм Уэлча, который позволяет определять графоэлементы определённой формы, соответствующие артефактам и патологическим состояниям мозга, а также оценивать энергетические соотношения основных ритмов в электроэнцефалограмме. Разработанный алгоритм использует графический процессор одноплатного компьютера Nvidia Jetson Nano, что позволяет задействовать параллельные вычисления и увеличить скорость выполнения предложенного алгоритма. Обоснован выбор элементной базы, представлены ее преимущества. Разработаны блок-схема, 3D-модель и выполнена сборка портативного электроэнцефалографа. Габариты электроэнцефалографа составили: ширина — 250 мм, высота — 72 мм, глубина — 111 мм. Приведена подробная схема соединений элементной базы электроэнцефалографа. Разработанный электроэнцефалограф обладает блоком питания, который позволяет функционировать электроэнцефалографу в течение длительного времени автономно. Разработан графический интерфейс пользователя, производящий управление электроэнцефалографом с помощью сенсорного экрана. Предложена методика исследования автономного портативного электроэнцефалографа. Проведены испытания прототипа, в ходе которых исследовались сигналы с глазными артефактами, которые имеют характерный вид. В ходе испытаний все глазные артефакты были однозначно определены в анализируемых сигналах. Практическим путем получено, что предложенный алгоритм работы электроэнцефалографа выполняется за 100 мс при длительности восьмиканальной ЭЭГ 1 с и частоте дискретизации 250 Гц. Полученные результаты длительности выполнения алгоритма показывают, что имеется значительный запас по вычислительной мощности устройства, что позволит в дальнейшем производить более сложную обработку ЭЭГ

**Ключевые слова:** портативный электроэнцефалограф, графический процессор, Nvidia Jetson, аналогово-цифровой преобразователь, вейвлет, частотно-временной анализ

### Введение

В настоящее время в связи с пандемией SARS-CoV-2 наблюдается рост заболеваемости центральной нервной системы (ЦНС). Как известно, одной из основных частей ЦНС человека является его головной мозг. В связи с этим для функциональной диагностики головного мозга могут быть использованы методы, основанные на анализе электроэнцефалограммы.

Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) — это сигнал, который может быть зарегистрирован с поверхности головы человека и является результатом суммации и фильтрации электрической активности отдельных групп нейронов [1]. При регистрации ЭЭГ важно выделять её основные ритмы, а также выявлять графоэлементы особой формы, соответствующие пато-

логическим состояниям мозга и артефактам (явлениям, не связанным с деятельностью мозга).

Для регистрации электроэнцефалограммы используются специальные устройства, которые называются электроэнцефалографами. Они подразделяются на стационарные и портативные. Как правило, стационарные электроэнцефалографы устанавливаются в специально оборудованных помещениях и функционируют на базе стационарного компьютера. Портативные электроэнцефалографы подразделяются на устройства на базе передвижных компьютеров и на устройства в виде самостоятельных модулей. В ряде случаев может отсутствовать возможность проведения электроэнцефалографического исследования в специально подготовленном помещении, а также возможность привлечения для анализа ЭЭГ врача-физиолога. В этом случае необходимо исполь-

зовать устройства, позволяющие проводить электроэнцефалографические исследования в любых условиях и не требующие специальной квалификации медицинского персонала.

Целью данной работы является разработка автономного портативного электроэнцефалографа, позволяющего выполнять регистрацию электроэнцефалограммы, а также пригодного для последующей её обработки в реальном времени с помощью специальных алгоритмов. Поставленная цель достигается путем последовательного решения следующих задач:

1. Разработка концепции автономного портативного электроэнцефалографа и его структуры.
2. Выбор элементной базы для реализации электроэнцефалографа.
3. Разработка блок-схемы создаваемого устройства.
4. Создание алгоритма работы электроэнцефалографа с использованием методов частотно-временного анализа сигналов.
5. Разработка 3D-модели корпуса для портативного электроэнцефалографа и непосредственное его изготовление.
6. Разработка графического приложения пользователя для управления электроэнцефалографом.
7. Реализация портативного электроэнцефалографа.
8. Разработка методики испытаний.
9. Проведение испытаний.

Актуальность данной работы заключается в обеспечении возможности создания портативного электроэнцефалографа, обладающего компактными размерами, способного работать длительное время автономно и позволяющего выполнять обработку сигналов в реальном времени.

### Разработка прототипа

Авторами данной статьи предлагается следующая концепция портативного электроэнцефалографа. В общем случае портативный электроэнцефалограф состоит из блока регистрации данных, блока обработки данных и блока визуализации данных (рис. 1).

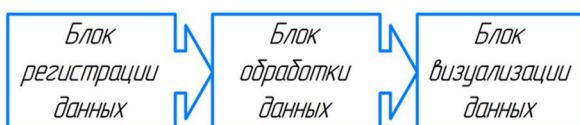


Рис. 1. Блок-схема концепции электроэнцефалографа

К блоку регистрации данных предъявляются следующие требования: многоканальность, низкий уровень собственных шумов, высокое разрешение. Проведённые исследования показали [2], что при регистрации электроэнцефалограммы может быть использован аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ADS1299 фирмы Texas Instruments. Он относится к типу сигма-дельта АЦП и обладает следующими основными характеристиками [2]:

- Разрядность 24 бита;
- Низкий собственный уровень шума (коэффициент собственного шума не более -115 дБ);
- Наличие встроенного усилителя с программируемым коэффициентом усиления (PGA);
- Частота дискретизации от 250 Гц до 16 кГц.

Разрабатываемый вычислитель должен производить обработку многоканальных сигналов в реальном времени. Поставленные задачи требуют высокой производительности элементной базы. При обработке многоканальных данных целесообразно использовать параллельные вычисления. В связи с этим в качестве вычислителя может быть выбрана система, содержащая в себе графический процессор и обладающая возможностью параллельного распределения вычислительных потоков, в том числе с использованием технологии CUDA [3].

Среди современных систем на базе графического процессора можно выделить дискретные и встроенные в процессор видеокарты, а также одноплатные компьютеры. Дискретные видеокарты отличаются высокой производительностью, но обладают большими размерами и требуют наличия компьютера. Интегрированные видеокарты обладают низкой производительностью. Одноплатные компьютеры обладают малыми габаритами, высокой производительностью и низкой стоимостью.

В качестве вычислительного устройства был выбран одноплатный компьютер Nvidia Jetson Nano. Его выбор был связан с тем, что в отличие от аналогов (Raspberry Pi, Orange Pi, ASUS TinkerBoard, Google Coral.ai), он обладает высокой производительностью и малыми габаритами.

Для вывода графика электроэнцефалограммы и управления электроэнцефалографом был использован дисплей с сенсорным экраном, так как он позволяет исключить исполь-



зование других элементов управления (клавиатуры, компьютерной мыши, джойстика). Размер и разрешение экрана были выбраны исходя из возможности отображения электроэнцефалограммы в удобном для визуального анализа виде, вывода результатов обработки ЭЭГ, а также необходимостью соблюдения небольших габаритов электроэнцефалографа.

Для обработки электроэнцефалограммы может быть использован алгоритм на основе непрерывного вейвлет-преобразования и периодограмм Уэлча [4, 5]. Преобразования на основе вейвлетов позволяют производить частотно-временной анализ сигналов.

Вейвлеты – это обобщённое название особых функций с нулевым интегральным значением, локализованных по оси времени и способных к сдвигу и масштабированию [6-8].

Формула непрерывного вейвлет преобразования (НВП) сигнала  $s(t)$  имеет вид:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

где  $\psi(t)$  – вейвлет,  $a$  – масштаб,  $b$  – временной сдвиг, горизонтальной чертой над вейвлетной функцией обозначено комплексное сопряжение.

В данной работе использовался метод вычисления НВП на основе быстрого преобразования Фурье [9, 10].

Таким образом, научная новизна данной работы заключается в разработке электроэнцефалографа на базе графического процессора, реализующего алгоритм обработки ЭЭГ с использованием математического аппарата вейвлетов и метода периодограмм Уэлча.

На рис. 2 представлен модифицированный алгоритм на основе непрерывного вейвлет-преобразования и метода периодограмм Уэлча, предложенный авторами [4].

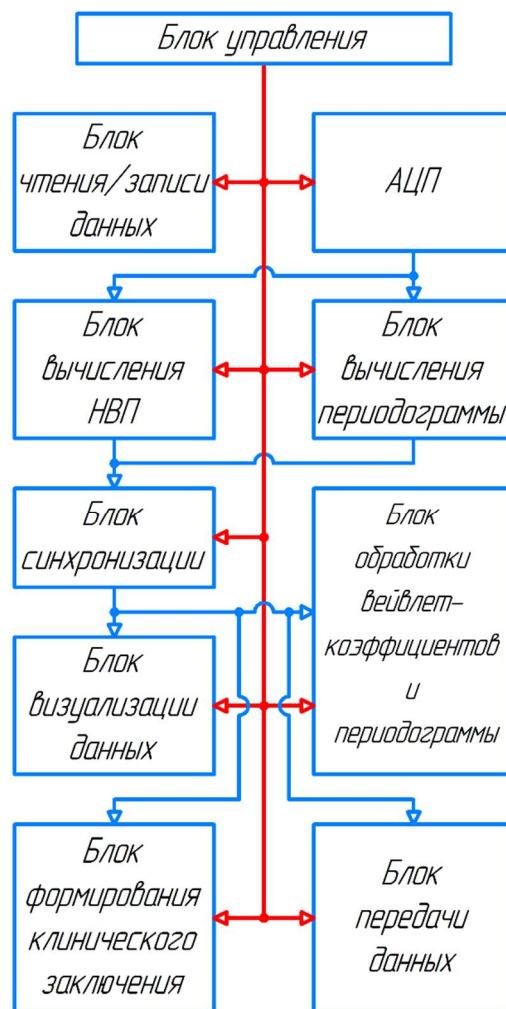


Рис. 2. Блок-схема модифицированного алгоритма обработки ЭЭГ

Приведенная на рис. 2 блок-схема включает в себя следующие элементы:

1. Блок управления.
2. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП).
3. Блок чтения/записи данных и формирование метаданных.
4. Блок вычисления непрерывного вейвлет-преобразования (НВП).
5. Блок вычисления периодограммы.
6. Блок визуализации данных.
7. Блок передачи данных (на выделенный сервер и/или на физический носитель).
8. Блок обработки вейвлет-коэффициентов и периодограммы.
9. Блок формирования клинического заключения.

Блок управления обеспечивает конфигурацию большей части элементов схемы. Аналого-цифровой преобразователь предназначен для дискретизации и квантования биомеди-

цинского аналогового сигнала, регистрируемого на электродах. В некоторых случаях сигнал ЭЭГ может быть загружен в память электроэнцефалографа, кроме того, сигнал ЭЭГ может содержать метаданные о пациенте (ФИО, год рождения, пол, дата проведения электроэнцефалографического исследования, адрес проживания пациента, ФИО и должность врача, тип проводимого исследования, конфигурацию отведений и пр.). Эти данные могут быть использованы при обработке ЭЭГ и формировании клинического заключения. Блок вычисления НВП предназначен для выполнения непрерывного вейвлет-преобразования с заданным вейвлетом и коэффициентами масштаба с целью определения основных информационных признаков в сигнале. Блок вычисления периодограммы использует метод Уэлча для оценки спектральной плотности мощности с целью выделения энергии основных ритмов ЭЭГ. Блок синхронизации обеспечивает совместную работу блоков вычисления НВП и периодограмм Уэлча. Данный блок является необходимым, так как вычисление матрицы вейвлет-коэффициентов требует значительно больше времени по сравнению с вычислением периодограммы Уэлча. Блок визуализации данных позволяет визуализировать регистрируемый или записанный сигнал, результаты вычисления НВП, периодограмму Уэлча и клиническое заключение. Блок записи и передачи данных позволяет сохранять и/или передавать не только зарегистрированные данные, но также и результат их обработки. Блок формирования клинического заключения производит анализ полученных данных и формирует заключение о состоянии пациента.

На рис. 3 приведена схема устройства, которая включает в себя следующие элементы:

1. Одноплатный компьютер Nvidia Jetson Nano. Является основным управляющим и вычислительным устройством для всех составляющих схемы, содержит в себе графический процессор, который позволяет проводить параллельные вычисления.

2. Модуль электроснабжения. Используется для обеспечения бесперебойного питания всех элементов схемы. Общая емкость элементов питания равна 3400x4 мАч. Данный мо-

дуль позволяет обеспечивать автономную работу устройства в течение 7 часов при постоянно работающем дисплее. В состоянии выключенного дисплея время работы устройства в автономном режиме составляет 9 часов. В режиме энергосбережения (отсутствует обработка получаемого сигнала) устройство способно работать непрерывно 11 часов. Модуль электроснабжения постоянно передает данные о состоянии заряда элементов питания на Nvidia Jetson Nano. При подключении внешнего зарядного устройства электроэнцефалограф выдает сообщение о невозможности регистрации ЭЭГ с поверхности головы пациента в целях обеспечения безопасности и для исключения возможности его поражения электрическим током.

3. Аналогово-цифровой преобразователь TI ADS1299 EEGFE-PDK позволяет производить дискретизацию и квантование сигнала, регистрируемого электродами. Кроме того, АЦП содержит в себе программируемый усилитель с максимальным усилением в 24 раза. Передача данных АЦП производится с помощью интерфейса SPI.

4. Данные с АЦП через интерфейс SPI передаются на микроконтроллер Arduino Nano, который производит первичную обработку сигнала ЭЭГ (режекторный БИХ-фильтр 2 порядка для исключения частоты 50 Гц тока промышленной частоты). Кроме того, микроконтроллер осуществляет непосредственное управление параметрами АЦП (частота дискретизации, усиление и пр.). С помощью интерфейса UART микроконтроллер Arduino Nano передает данные для последующей обработки на одноплатный компьютер Nvidia Jetson Nano.

5. Блок преобразования логических уровней служит для согласования напряжений микроконтроллера Arduino Nano, рабочее напряжение которого составляет 5В, с рабочим напряжением 3,3В интерфейса UART на Nvidia Jetson Nano.

6. Дисплей с диагональю 7,9 дюймов и разрешением 400x1280 точек. Дисплей обладает сенсорным экраном. Взаимодействие дисплея с одноплатным компьютером производится через интерфейсы HDMI и USB.

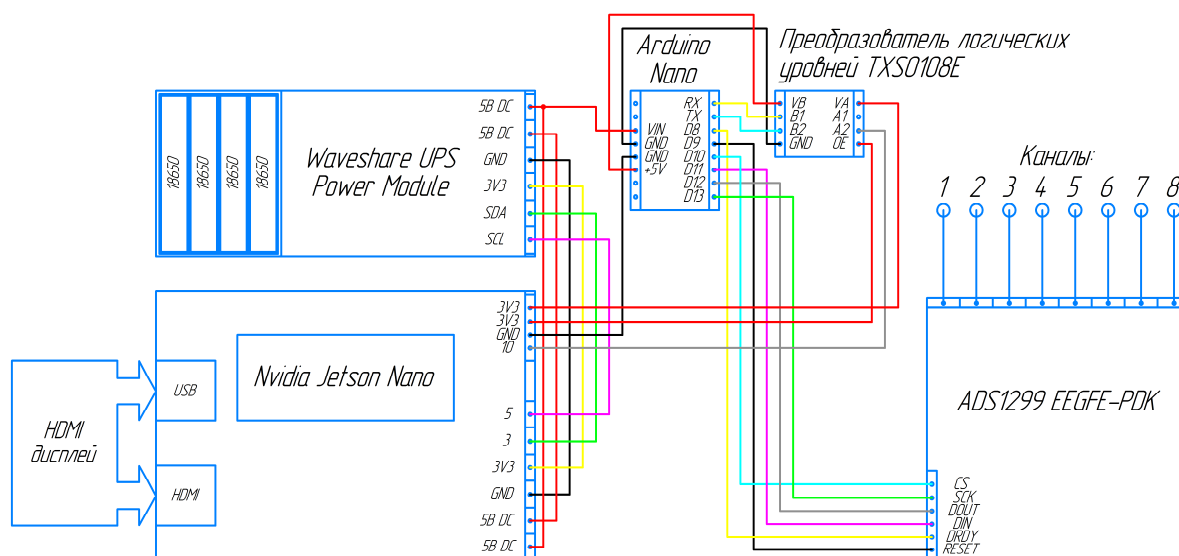
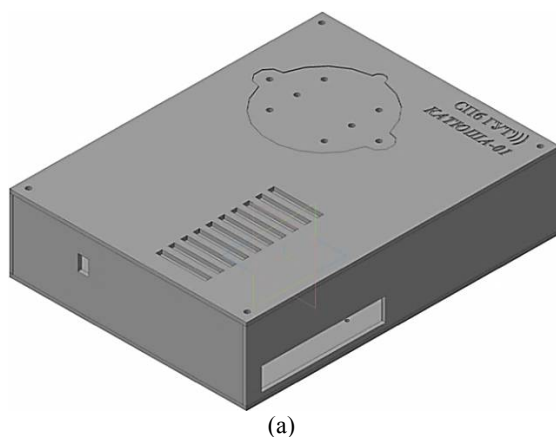


Рис. 3. Схема устройства

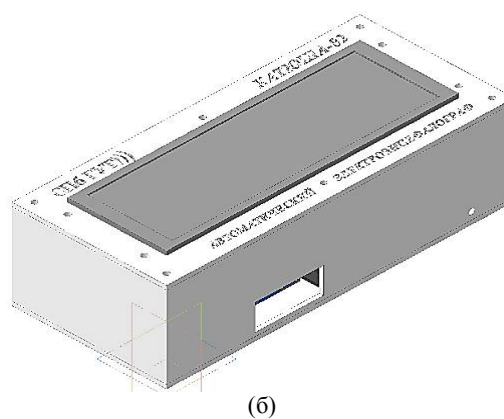
Для данного устройства также требуется разработка корпуса. С этой целью были разработаны две 3D-модели корпусов электроэнцефалографов (“Катюша-01” и “Катюша-02”) (рис. 4). Электроэнцефалографы названы в честь студентки 5 курса СПбГУТ Караченковой Екатерины Борисовны.

У разработанных электроэнцефалографов следующие габариты:

- Электроэнцефалограф “Катюша-01”, (рис. 4, а): ширина 252 мм, высота 63 мм, глубина 191 мм.
- Электроэнцефалограф “Катюша-02” (рис. 4, б): ширина 250 мм, высота 72 мм, глубина 111 мм.



(а)



(б)

Рис. 4. 3D-модели разработанных корпусов электроэнцефалографов

По разработанным 3D-моделям на лазерном станке были изготовлены корпуса из полиметилакрилата (оргстекло). Первая версия электроэнцефалографа “Катюша-01” (рис. 5, а) не содержала в себе дисплея и поэтому требовала отдельного устройства вывода изображения (монитор). Также устройство требовало внешних устройств управления (компьютерной мыши и клавиатуры). Вторая версия электроэнцефалографа “Катюша-02” (рис. 5, б) уже содержит в себе дисплей со встроенным ёмкостным сенсорным экраном, позволяющим

производить управление электроэнцефалографом.



(а)

Рис. 5. Внешний вид электроэнцефалографов

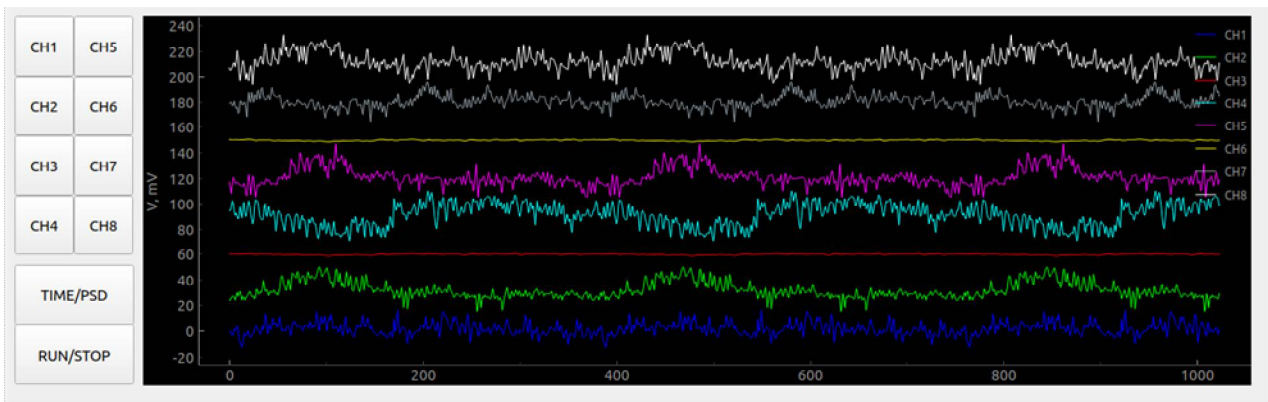


(б)

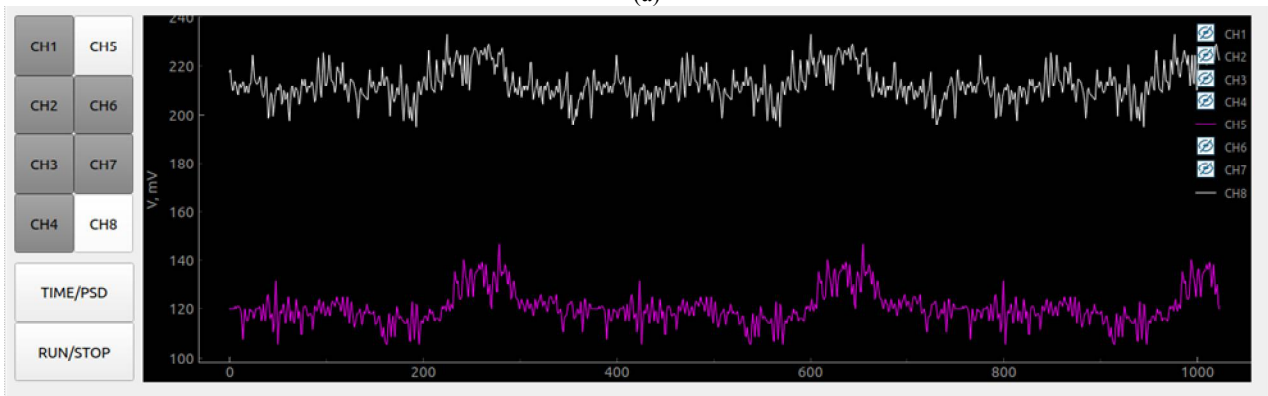
Рис. 5. Внешний вид электроэнцефалографов  
(продолжение)

Для обеспечения визуализации данных и управления электроэнцефалографом был разработан графический интерфейс пользователя. В качестве языка программирования использовался Python с библиотеками *pyQt* и *pyQtGraph*. На рис. 6 приведен внешний вид интерфейса пользователя в различных режимах его работы:

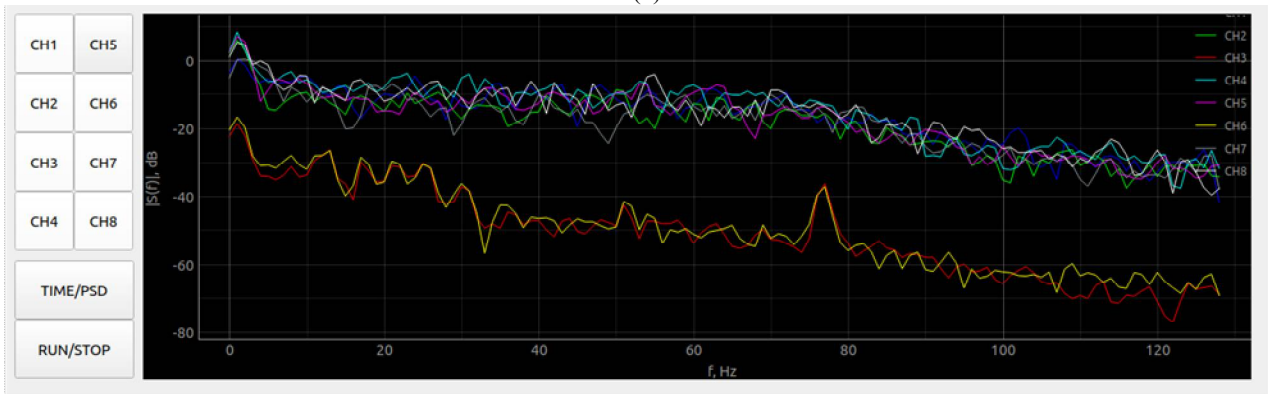
- В режиме отображения сигнала ЭЭГ (рис. 6, а).
- В режиме отображения ЭЭГ для двух выделенных каналов (рис. 6, б).
- В режиме отображения периодограммы Уэлча (рис. 6, в).



(а)



(б)



(в)

Рис. 6. Графический интерфейс пользователя



### Испытание прототипа

Для проведения испытаний портативного электроэнцефалографа “Катюша-02” была разработана следующая методика испытаний:

1. Конфигурация устройства, в том числе выбор источника сигналов: с физического носителя или регистрируемый с поверхности головы человека.

2. Визуальный анализ электроэнцефалограммы с привлечением физиолога.

3. Получение вейвлет-спектрограммы и периодограммы Уэлча.

4. Визуальный анализ полученных графиков.

5. Обработка вейвлет-коэффициентов и значений периодограммы.

6. Формирование клинического заключения.

7. Сравнение результатов анализа, полученных врачом-физиологом и при обработке сигналов.

Приведем результаты испытаний.

1. Выполнена конфигурация устройства. На АЦП была установлена частота дискретизации 250 Гц и коэффициент усиления в 24 раза. Количество активных каналов 8. Проверка работы устройства на тестовом сигнале, генерируемом АЦП. Проверка уровней шумов.

2. Выполнен визуальный анализ с привлечением врача-физиолога. В качестве искомого графоэлемента было предложено выделять фрагмент сигнала, содержащего глазной артефакт. Он обладает определенной формой, амплитудой и основной частотой. Было отобрано 12 сигналов, 3 из которых содержат глазные артефакты. При этом глазные артефакты, содержащиеся в сигнале, были типовой формы.

3. Получены вейвлет-спектрограммы с использованием вейвлета «мексиканская шляпа». Как показали исследования [11], проведенные одним из авторов данной работы, данный вейвлет наиболее пригоден для анализа ЭЭГ. При построении периодограммы Уэлча использовались следующие параметры:

- Количество сегментов 256;
- Процент перекрытия сегментов 50%;
- Окно Ханна.

4. Проведенный визуальный анализ полученных вейвлет-спектрограмм и периодограмм Уэлча показал:

• Глазные артефакты получили локализованные отображения на вейвлет-спектрограмме в виде светлых областей

(большие значения вейвлет-коэффициентов для масштаба, соответствующего основной частоте глазных артефактов).

• Определены энергетические соотношения основных ритмов ЭЭГ.

5. В качестве способа обработки была использована пороговая обработка вейвлет-коэффициентов и периодограммы Уэлча.

6. В качестве клинического заключения было сформировано сообщение о количестве глазных артефактов в исследуемых ЭЭГ, а также доминирующий ритм сигнала ЭЭГ.

7. Сравнение полученных результатов визуального анализа и результатов обработки показало, что во всех 3 электроэнцефалограммах были выделены глазные артефакты.

Полученные результаты требуют пояснения. Предложенный подход был заведомо простым. При анализе исследовались отведения ЭЭГ, соответствующие лобным долям, где глазные артефакты наиболее выражены. Анализ других отведений не производился, так как для выявления глазных артефактов в них требуется более сложный алгоритм обработки, поскольку графоэлементы, соответствующие глазным артефактам, по мере распространения от лобных отведений к затылочным претерпевают значительные искажения. Также анализу подвергались сигналы с глазными артефактами характерного вида. В связи с этим использование пороговой обработки вейвлет-коэффициентов оказалось достаточным для выявления глазных артефактов. Для определения других графоэлементов сигнала ЭЭГ требуется более сложная обработка вейвлет-коэффициентов, в том числе с применением искусственных нейронных сетей.

Данный алгоритм позволил выполнять анализ ЭЭГ в реальном времени. При этом имеется запас вычислительных ресурсов для использования более сложных алгоритмов анализа ЭЭГ. Проведенная оценка вычислительных затрат на реализованную обработку составила около 10% от общей вычислительной мощности устройства. Данный алгоритм был выполнен за 100 мс при длительности многоканального сигнала в 1 с.

### Заключение

В качестве основных результатов данной работы можно отметить следующее:

1. Предложена концепция автономного портативного электроэнцефалографа на базе графического процессора.

2. Разработан модифицированный алгоритм функционирования устройства.

3. Изготовлен прототип устройства.

4. Разработана методика испытания автономного портативного электроэнцефалографа.

5. Произведены испытания прототипа предложенного устройства.

При анализе 12 записей электроэнцефалограммы, в трех из которых содержались глазные артефакты, точность выявления глазных артефактов с использованием пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и значений периодограммы Уэлча составила 100%. При этом данный алгоритм был выполнен за 100 мс, что позволяет использовать выбранную элементную базу при дальнейшей обработке вейвлет-коэффициентов с целью выявления других видов особенностей в сигнале.

Дальнейшее развитие проекта предполагает разработку на базе предложенного портативного электроэнцефалографа устройства, работающего в полностью автоматическом режиме и способного анализировать ЭЭГ без участия врача-физиолога (автоматического портативного электроэнцефалографа) [12].

#### Литература

1. Зенков Л.Р., Ронкин М.А. Функциональная диагностика нервных болезней: руководство для врачей. М.: МЕДпресс-информ, 2011. 448 с.

2. Запайшиков А.В., Козлов Д.В., Степанов А.Б. Разработка портативного электроэнцефалографа на базе

графического процессора. // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2021): Всерос. науч.-метод. конф. магистрантов и их руководителей. СПб.: СПбГУТ, 2022. С. 73-76.

3. Nvidia corp. The API reference guide for CUDA.

4. Козлов Д.В., Степанов А.Б. Алгоритм выполнения частотно-временного анализа сигналов с применением непрерывного вейвлет-преобразования и метода периодограмм и его реализация на графическом процессоре // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. №3. С. 85-93.

5. Welch P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms// IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1967. Vol. 15. No. 2. pp. 70-73. DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901.

6. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. 58 с.

7. Stark H.-G. Wavelets and Signal Processing. Berlin: Springer, 2005. 158 p.

8. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК-Пресс, 2005, 304 с.

9. Zhuravov D.V., Stepanov A.B. Application of Simulink in the Implementation of Calculation Algorithms for Continuous Wavelet Transform on a Digital Signal Processor // Journal of Radio Electronics. 2019. Vol. 5. Pp. 12.

10. Kozlov D.V. and Stepanov A.B. The Main Features of a Multichannel Continuous Wavelet Transform Implementation on the Nvidia Jetson Single Board Computers// 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021. pp. 1632-1636. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396291.

11. Арбузов С.М., Степанов А.Б. Применение методов вейвлет-анализа в электроэнцефалографии. СПб.: Линк, 2009. 104 с.

12. Степанов А.Б. Автоматический портативный электроэнцефалограф // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2021): Всерос. науч.-метод. конф. магистрантов и их руководителей. СПб.: СПбГУТ, 2022. С. 150-153.

Поступила 07.02.2022; принята к публикации 19.04.2022

#### Информация об авторах

**Степанов Андрей Борисович** – канд. техн. наук, заместитель директора института магистратуры по учебной работе, доцент кафедры радиосистем и обработки сигналов, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1), e-mail: sabarticle@yandex.ru, тел. +7(812)3263161

**Козлов Денис Витальевич** – магистрант, Московский физико-технический институт (141701, Россия, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9), e-mail: diroges@gmail.com

**Запайшиков Александр Викторович** – магистрант, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1), e-mail: zapayshikov.av1999@gmail.com

## AUTONOMOUS PORTABLE ELECTROENCEPHALOGRAPH BASED ON NVIDIA JETSON SINGLE-BOARD COMPUTER

A.B. Stepanov<sup>1</sup>, D.V. Kozlov<sup>2</sup>, A.V. Zapayshchikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

**Abstract:** the work is devoted to the implementation of an autonomous portable electroencephalograph based on an Nvidia Jetson Nano single-board computer and on an ADS1299 analog-to-digital converter from Texas Instruments. The electroencephalograph allows real-time recording and processing of 8 physical channels with sampling rates from 250 Hz to 16 kHz. The concept of this device is proposed, which consists of 3 main functional blocks: a data recording unit, a data processing unit, and a data visualization unit. We developed a modified algorithm for the operation of a portable electroencephalograph based on the calculation of wavelet coefficients and Welch's periodograms, which allows determining patterns of a certain shape corresponding to artifacts and pathological states of the brain, as well as evaluating the energy ratios of the main rhythms in the electroencephalogram. The developed algorithm uses the graphics processor of the Nvidia Jetson Nano single-board computer, which makes it possible to use parallel computing and increase the speed of the proposed algorithm. We substantiated the choice of the hardware and presented its advantages. We developed a block diagram, a 3D model and assembled a portable electroencephalograph. The dimensions of the electroencephalograph are as follows: width 250 mm, height 72 mm, depth 111 mm. We give a detailed connection diagram of the hardware of the electroencephalograph. The developed electroencephalograph has a power supply unit that allows the electroencephalograph to function autonomously for a long time. We developed a graphical user interface that allows controlling the electroencephalograph using a touch screen. We tested the prototype. During the test, signals with eye artifacts that have a special shape. During the tests, all eye artifacts were unambiguously identified in the analyzed signals. We practically got that the proposed algorithm of the electroencephalograph operation is performed in 100 ms with an eight-channel EEG duration of 1 s and a sampling frequency of 250 Hz. The obtained results of algorithm execution show that there is a significant margin in terms of the computing power of the device, which will allow more complex EEG processing in the future

**Key words:** portable electroencephalograph, graphical processing unit, Nvidia Jetson, analog-to-digital converter, wavelet, time-frequency analysis

### References

1. Zenkov L.R., Ronkin M.A. "Functional diagnostics of nervous diseases: a guide for physicians" ("Funktional'naya diagnostika nervnykh bolezney: rukovodstvo dlya vrachey"), Moscow: MEDpress-inform, 2011, 448 p.
2. Zapaishnikov A.V., Kozlov D.V., Stepanov A.B. "Development of a portable electroencephalograph based on a GPU", *Proc. of the conf.: Training of Professional Personnel in the Magistracy for the Digital Economy (PKM-2021) (Podgotovka professional'nykh kadrov v magistrature dlya tsifrovoy ekonomiki (PKM-2021): Vseros. nauch.-metod. konf. magistrantov i ikh rukovoditeley)*, St. Petersburg: SPbSUT, 2022, pp. 73-76
3. Nvidia corp. The API reference guide for CUDA.
4. Kozlov D.V., Stepanov A.B. "Time-frequency signal analysis algorithm using continuous wavelet transform and Welch's periodogram method with its implementation on graphical processing unit", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 3, pp. 85-93.
5. Welch P. "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms", *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, June 1967, vol. 15, no. 2, pp. 70-73, doi: 10.1109/TAU.1967.1161901.
6. Vityazev V.V. "Wavelet time series analysis" ("Veyvlet-analiz vremennykh ryadov"), St. Petersburg, 2001, 58 p.
7. Stark H.-G. "Wavelets and signal processing", Berlin: Springer, 2005, 158 p.
8. Smolentsev N.K. "Fundamentals of wavelet theory. Wavelets in MATLAB" ("Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB"), Moscow: DMK-Press, 2005, 304 p.
9. Zhuravov D.V., Stepanov A.B. "Application of simulink in the implementation of calculation algorithms for continuous wavelet transform on a digital signal processor", *Journal of Radio Electronics*, 2019, vol. 5, pp. 12.
10. Kozlov D.V., Stepanov A.B. "The Main features of a multichannel continuous wavelet transform implementation on the Nvidia Jetson single board computers", *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 1632-1636, DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396291.
11. Arbuzov S.M., Stepanov A.B. "Application of methods of wavelet analysis in electroencephalography" ("Primenenie metodov veyvlet-analiza v elektroentsefalografii"), Saint Petersburg: Link, 2009, 104 p.
12. Stepanov A.B. "Automatic portable electroencephalograph", *Proc. of the conf.: Training of Professional Personnel in the Magistracy for the Digital Economy (PKM-2021) (Podgotovka professional'nykh kadrov v magistrature dlya tsifrovoy ekonomiki (PKM-2021): Vseros. nauch.-metod. konf. magistrantov i ikh rukovoditeley)*, St. Petersburg: SPbSUT, 2022, pp. 150-153.

Submitted 07.02.2022; revised 19.04.2022

### Information about the authors

**Andrey B. Stepanov**, Cand. Sci. (Technical), Deputy Director of Academic Affairs of the Master's degree Institute, Associate Professor, Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications (22 Bol'shevnikov prospekt, St. Petersburg 193232, Russia), e-mail: sabarticle@yandex.ru, tel.: +7(812) 326 31 61, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6876-729X>

**Denis V. Kozlov**, student, Moscow Institute of Physics and Technology (9 Institutskiy alley, Dolgoprudny 141701, Moscow Region, Russia), e-mail: diroges@gmail.com

**Aleksandr V. Zapayshchikov**, student, Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications (22 Bol'shevnikov prospekt, St. Petersburg 193232, Russia), e-mail: zapaishnikov.av1999@gmail.com

## ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СДВОЕННОГО ТИПА ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

С.В. Бирюков<sup>1,2</sup>, А.В. Тюкин<sup>2</sup>, Л.В. Тюкина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

<sup>3</sup>Омский промышленно-экономический колледж, г. Омск, Россия

**Аннотация:** анализируются базовые сдвоенные сферические электроиндукционные датчики напряженности электрического поля с целью выявления их конструктивных параметров и параметров взаимодействия датчиков с ЭП, влияющих на погрешность его восприятия. Проводится оптимизация чувствительных элементов датчика с целью выявления минимума погрешности и максимума его пространственного диапазона измерений, в котором обеспечивается его минимальная погрешность. Оптимизация позволила снизить погрешность базовых датчиков приблизительно в два раза, т.е. с  $\pm 4,6\%$  до  $\pm 2\%$  и предложить три возможных варианта выполнения чувствительных элементов сдвоенных датчиков. В первом варианте угловой размер  $\theta_{01}$  второй пары чувствительных элементов увеличен с  $45^\circ$  до  $47^\circ$ . Это позволило снизить погрешность датчика до  $\pm 2,1\%$  при верхнем пределе пространственного диапазона измерения  $\alpha=0,93$ . Во втором варианте угловой размер  $\theta_{02}$  первой пары чувствительных элементов увеличен с  $45^\circ$  до  $47^\circ$  при постоянном размере  $\theta_{01}=90^\circ$  этой же пары, а угловой размер  $\theta_{01}$  второй пары чувствительных элементов также увеличен с  $45^\circ$  до  $47^\circ$ . Это позволило снизить погрешность второго варианта датчика до  $\pm 2,1\%$  при верхнем пределе пространственного диапазона измерения  $\alpha=0,93$ . В третьем варианте угловой размер  $\theta_{02}$  первой пары чувствительных элементов уменьшен с  $45^\circ$  до  $40^\circ$  при постоянном размере  $\theta_{01}=90^\circ$  этой же пары, а угловой размер  $\theta_{01}$  второй пары чувствительных элементов уменьшен с  $45^\circ$  до  $35^\circ$ . При этом погрешность датчика во всем пространственном диапазоне не превышает  $\pm 2\%$ . Используя сдвоенные датчики трех вариантов исполнения, можно добиться значительного повышения точности измерения напряженности неоднородных ЭП в широком пространственном диапазоне измерений по сравнению с базовыми датчиками, при этом третий вариант предпочтительней

**Ключевые слова:** датчик напряженности электрического поля, двойной датчик, сдвоенный датчик, напряженность электрического поля, погрешность от неоднородности поля

### Введение

Практически во всех областях науки и техники широко используются всевозможные датчики различных физических величин. Датчики позволяют выявлять не только факт присутствия той или иной физической величины в исследуемой области пространства, но и определять с гарантированной погрешностью её численное значение, а также устанавливать взаимосвязи между различными физическими величинами [1-15]. Одной из физических величин, измерение которой очень актуально в энергетике, электро- и радиотехнике, приборостроении и других областях промышленности, является напряженность электрического поля (НЭП), в частности низкочастотного. Для измерения напряженности низкочастотного (до 1 МГц) электрического поля (ЭП) широкое распространение получили электроиндукционные датчики, основанные на электростатической индукции. Известные из технической литературы [18-23] датчики НЭП в однородных ЭП обладают погрешностью до  $\pm 20\%$ . В

реальных неоднородных полях эта погрешность еще больше. В работах [24-28] предложены сдвоенные электроиндукционные датчики НЭП нового типа, снижающие погрешность измерения в неоднородном поле до  $\pm 5\%$  практически во всем пространственном диапазоне измерения, т.е. вплоть до расстояний от источника поля, соизмеримых с размерами датчика.

Данная работа направлена на улучшение метрологических характеристик сдвоенных датчиков, в частности, на уменьшение их погрешности в неоднородных ЭП.

### Постановка задачи

Для обеспечения возможности построения сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков, обеспечивающих восприятие напряженности электрического поля с погрешность менее  $\pm 5\%$  в широком пространственном диапазоне, необходимо решить следующие задачи:

-проанализировать сдвоенные электроиндукционные датчики НЭП [24-28] с целью выявления их конструктивных параметров и па-



параметров взаимодействия датчиков с ЭП, влияющих на погрешность восприятия ЭП;

-составить математические модели различных конструктивных решений, сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков НЭП, учитывающие выявленные конструктивные параметры и параметры взаимодействия датчиков с ЭП, влияющие на погрешность восприятия ЭП;

-получить целевую функцию, учитывающую конструктивные параметры и параметры взаимодействия датчиков с ЭП, влияющие на погрешность восприятия ЭП;

-провести оптимизацию целевой функций датчиков по отмеченным параметрам с целью выявления минимума погрешности датчиков и максимума его пространственного диапазона измерений, в котором обеспечивается его минимальная погрешность.

### Конструктивные решения известных сдвоенных датчиков

В работах [24-28] рассмотрены два конструктивных решения сдвоенных однокоординатных датчиков, отличающихся только лишь формированием чувствительных элементов, не влияющих на их общие конструктивные размеры и метрологические характеристики.

Примем за базовые конструкции сдвоенные датчики, описанные в работах [24-28], и представим их находящимися в ЭП точечного источника  $q(t)$  на рис. 1.

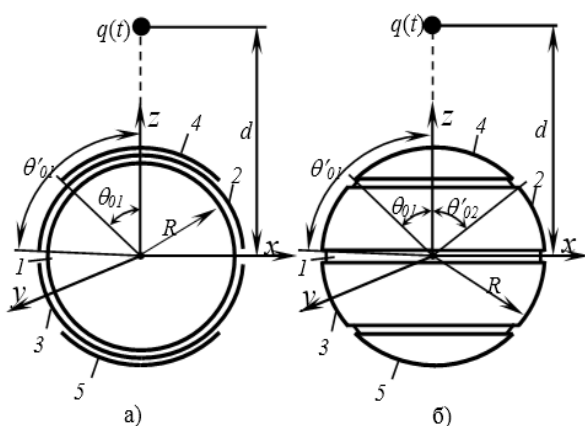


Рис. 1. Базовые конструктивные решения сдвоенных датчиков

В основе базовых конструкций датчиков лежит проводящая сфера 1 радиуса  $R$  с двумя парами диаметрально расположенных на одной координатной оси чувствительных элементов 2-3 и 4-5. Чувствительные элементы

изолированы между собой и проводящей сферой 1. Расстояние между чувствительными элементами и проводящей сферой много меньше её радиуса, что позволяет считать поверхность датчика единой сферической поверхностью. Чувствительные элементы можно наносить на поверхность сферы напылением. Поэтому для изготовления таких датчиков хорошо подходят методы нанотехнологий.

Чувствительные элементы базовых конструкций представляют собой сферические сегменты и сферические слои (рис. 2).

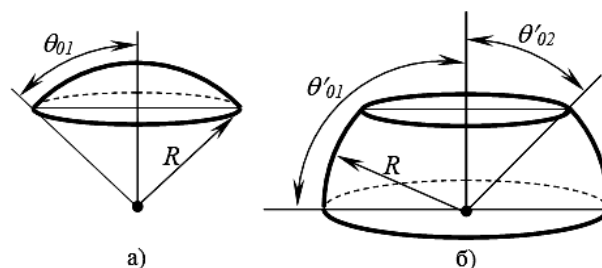


Рис. 2. Формы чувствительных элементов: а) сферический сегмент; б) сферический слой

Из рис. 2 следует, что основными конструктивными параметрами чувствительных элементов наряду с радиусом  $R$  являются их угловые размеры. В общем случае форма чувствительного элемента определяется двумя угловыми размерами  $\theta'_{01}$  и  $\theta'_{02}$ . Тогда его параметры можно записать как  $\{\theta'_{01}, \theta'_{02}\}$ , где  $\theta'_{01}$  – угловой размер при основании, а  $\theta'_{02}$  – угловой размер при вершине чувствительного элемента (см. рис. 2, б). При  $\theta'_{02}=0$  получаем сферический сегмент в общем случае, с угловым размером  $\theta_{01}$  (см. рис. 2, а), и его параметры можно записать как  $\{\theta_{01}, 0\}$ . При  $\theta'_{01}=90^\circ$  и  $\theta'_{02}=0$  получаем полусферу (частный случай сферического сегмента), и её параметры можно записать как  $\{90^\circ, 0\}$ .

Применительно к базовым конструктивным решениям сдвоенных датчиков, первая пара чувствительных элементов датчика, представленного на рис. 1,а, выполнена в форме полусфер (элементы 2-3) с угловым размером  $\theta'_{01} \leq 90^\circ$ , а вторая пара чувствительных элементов выполнена в форме сферических сегментов (элементы 4-5) с угловым размером  $\theta_{01} \leq 45^\circ$ . В этой конструкции датчика чувствительные элементы накладываются изолированно друг от друга. Такие датчики будем называть датчики с накладными чувствительными элементами.

Для датчика, представленного на рис. 1,б, чувствительные элементы 2-3, входящие в первую пару, выполнены в форме сферического слоя с угловым размером у основания  $\theta'_{01} \leq 90^\circ$  и с угловым размером у вершины  $\theta'_{02} \geq 45^\circ$ , а чувствительные элементы второй пары выполнены в форме сферических сегментов (элементы 4-5) с угловым размером  $\theta_{01} \leq 45^\circ$ . Следует отметить, что в датчике (рис. 1, б) первая пара чувствительных элементов является составной, и элементы формируются один из второго и четвертого элементов (как 2+4), а другой из третьего и пятого элементов (как 3+5). Поэтому общий угловой размер составных чувствительных элементов в этом случае также будет составлять  $\theta'_0 \leq 90^\circ$ . Такие датчики будем называть датчики с составными чувствительными элементами.

Для оценки взаимодействия датчиков с ЭП выберем поле точечного заряда (униполя). Характерной особенностью такого поля является возможность путем изменения расстояния  $d$  (см. рис. 1) от датчика до источника поля моделировать поля различной неоднородности.

Введем показатель взаимодействия датчика с ЭП. Таким показателем может служить параметр

$$a = R/d, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус датчика.

Этот показатель, с одной стороны, может характеризовать степень неоднородности поля (при  $a \rightarrow 0$  поле стремится к однородному, при  $a \rightarrow 1$  поле стремится к сильно неоднородному), а с другой, может определять пространственный диапазон измерения датчика, который может лежать в диапазоне  $R \leq d \leq \infty$  ( $0 \leq a \leq 1$ ).

На поверхностях чувствительных элементов каждого двойного датчика, входящего в состав сдвоенного датчика, находящегося в ЭП точечного заряда, будут формироваться индуцированные электрические заряды, дифференциальные значения которых определяются выражениями [24]:

$$\Delta q_1(t) = 6\pi\epsilon_0 R^2 [1 - \delta_1(a, 90^\circ, 0)] \cdot E_0(t); \quad (2)$$

$$\Delta q_2(t) = 6\pi\epsilon_0 R^2 [1 + \delta_2(a, 45^\circ, 0)] \cdot E_0(t), \quad (3)$$

где  $E_0(t)$  – НЭП в исследуемой точке пространства;  $\delta_1(a, 90^\circ, 0)$  и  $\delta_2(a, 45^\circ, 0)$  – погрешности от неоднородности ЭП, в общем случае определяемые из выражения [16, 20]

$$\delta_{1,2}(a, \theta_{01}, \theta_{02}) = \left[ \frac{1-a^2}{3a^2 \sin(\theta_{01}-\theta_{02}) \times \sin(\theta_{01}+\theta_{02})} \times \left( \frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_{02} + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{1+2a \cos \theta_{02} + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_{01} + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+2a \cos \theta_{01} + a^2}} \right) - 1 \right] \times 100, \quad (4)$$

где погрешность с индексом "1"  $\delta_1(a, \theta_{01}, \theta_{02})$  соответствует погрешности первого, а погрешность с индексом "2"  $\delta_2(a, \theta_{01}, \theta_{02})$  – второго датчика, входящих в состав сдвоенного датчика.

В работе [24] показано, что при измерении сдвоенным датчиком одновременно измеряются в данной точке пространства НЭП первым и вторым датчиком

$$E_1(t) = E_0(t) \cdot [1 - \delta_1(a, \theta_{01}, \theta_{02})]; \quad (5)$$

$$E_2(t) = E_0(t) \cdot [1 + \delta_2(a, \theta_{01}, \theta_{02})]. \quad (6)$$

Искомую напряженность, измеренную сдвоенным датчиком, находят как среднее значение из (5) и (6)

$$E(t) = \frac{E_1(t) + E_2(t)}{2} = E_0(t) \cdot [1 + \delta(a)], \quad (7)$$

$$\text{где } \delta(a) = \frac{|\delta_1(a, \theta_{01}, \theta_{02})| - |\delta_2(a, \theta_{01}, \theta_{02})|}{2} \quad (8)$$

- погрешность измеренного значения, а  $\delta_1(a, 90^\circ, 0)$  и  $\delta_2(a, 45^\circ, 0)$  - погрешности от неоднородности ЭП первого и второго датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика, соответственно.

Для наглядности представления входящих в выражение (4) погрешностей построим в математическом редакторе MathCAD-15 их графические зависимости от пространственного диапазона измерения  $a$  (неоднородности поля) для первого  $\delta_1(a, 90^\circ, 0)$ , второго  $\delta_2(a, 45^\circ, 0)$  двойных датчиков, входящих в сдвоенный датчик, и для сдвоенного датчика  $\delta(a)$  выражение (8). Графики погрешностей представлены на рис. 3. На рис. 3: 1 -  $\delta_1(a, 90^\circ, 0)$  погрешность первого датчика; 2 -  $\delta_2(a, 45^\circ, 0)$  погрешность второго датчика; 3 -  $\delta(a)$  погрешность сдвоенного датчика.

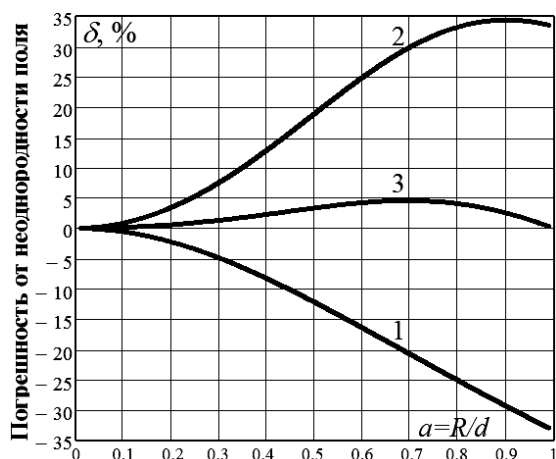


Рис. 3. Графики погрешности сдвоенного датчика

Из анализа графиков (см. рис. 3) следует, что погрешность измерения сдвоенных базовых датчиков (см. рис. 1) в неоднородном ЭП точечного заряда не превышает +4,6% в пространственном диапазоне измерения  $a$  практически от 0 до 1 и зависит от:

- конструктивных параметров чувствительных элементов, а именно от их угловых размеров;

- параметра взаимодействия датчика с ЭП  $a$ .

Отмеченные выше результаты анализа позволяют составить математическую модель сдвоенного датчика по оптимизации его чувствительных элементов с целью уменьшения погрешности от неоднородности ЭП и расширения пространственного диапазона измерений.

### Математическая модель сдвоенного датчика

В основу математической модели положены выражения (1), (4) и (8)

$$\begin{cases} a = R/d; \\ \delta_{1,2}(a, \theta_{01}, \theta_{02}) = \left[ \frac{1}{3a^2 \sin(\theta_{01} - \theta_{02}) \times \sin(\theta_{01} + \theta_{02})} \times \left( \frac{1}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_{02} + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_{02} + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_{01} + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_{01} + a^2}} \right) - 1 \right] \times 100; \\ \delta(a) = \frac{|\delta_1(a, \theta_{01}, \theta_{02})| - |\delta_2(a, \theta_{01}, \theta_{02})|}{2} \end{cases} \quad (9)$$

### Целевая функция

Целевой функцией для сдвоенных датчиков будет являться выражение (8), которое учитывает как конструктивные параметры  $(\theta_{01}, \theta_{02})$  сдвоенного датчика, так и параметр  $a$ , характеризующий взаимодействие датчика с ЭП. Поэтому в общем случае целевая функция сдвоенных датчиков будет иметь вид

$$\delta(a) = \frac{|\delta_1(a, \theta_{01}, \theta_{02})| - |\delta_2(a, \theta_{01}, \theta_{02})|}{2},$$

а в частном случае для базовых сдвоенных датчиков она будет определяться выражением

$$\delta(a) = \frac{|\delta_1(a, 90^\circ, 0)| - |\delta_2(a, 45^\circ, 0)|}{2}.$$

Для целевой функции с базовыми конструктивными параметрами минимальное значение погрешности от неоднородности поля составляет +4,6% практически во всем пространственном диапазоне измерения  $(0 \leq a \leq 0,99)$  (см. рис. 3).

Одной из задач исследований данной работы является оптимизация конструктивных параметров сдвоенного датчика для получения их минимально возможной погрешности  $\delta(a)$  при максимально возможном пространственном диапазоне измерения  $a$ .

### Оптимизация целевой функции сдвоенных датчиков

Оптимизацию будем проводить методом перебора угловых размеров чувствительных элементов при различных дискретных значениях параметра  $a$  и находить минимум погрешности  $\delta(a)$ , определяемой выражением (8) в максимально возможном диапазоне параметра  $a$ .

Оптимизация чувствительных элементов сдвоенного датчика первого конструктивного решения (см. рис. 1, а). Зададим начальные угловые размеры первой пары чувствительных элементов  $\theta_{01}=90^\circ$  и  $\theta_{02}=0$ , а у второй  $\theta_{01}=\theta$  и  $\theta_{02}=0$ , где  $\theta$  - переменный угловой размер. Пошагово (с шагом в  $1^\circ$ ) изменяя угловой размер  $\theta$  и строя в математическом редакторе MathCAD-15 графики погрешности в диапазоне изменения параметра  $a$ , находим оптимальный угловой размер  $\theta$  с точки зрения минимума погрешности  $\delta(a)$  целевой функции и максимума пространственного диапазона измерения  $a$ . Найденный угловой размер  $\theta$  составляет  $47^\circ$ . Тогда оптимальный размер второго чувстви-

тельного элемента будет определяться как  $\theta_{01}=47^\circ$  и  $\theta_{02}=0$ .

Графики минимизированной погрешности  $\delta(a)$  и этой же погрешности для базового сдвоенного датчика представлены на рис. 4.

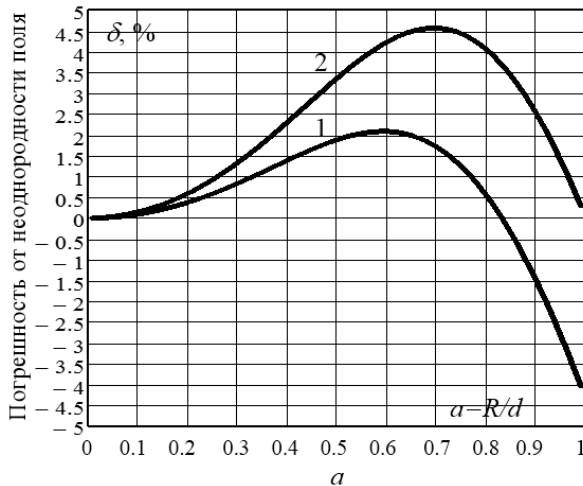


Рис. 4. Графики погрешности сдвоенного датчика с оптимизированными чувствительными элементами и базового датчика первого конструктивного решения

На рис. 4: 1 — погрешность датчика  $\delta(a)$  с оптимизированными чувствительными элементами; 2 — погрешность  $\delta(a)$  базового сдвоенного датчика.

Из сравнительного анализа графиков погрешности 1 и 2 (см. рис. 4) следует, что для сдвоенного датчика с оптимизированными чувствительными элементами погрешность датчика по сравнению с базовым датчиком уменьшилась приблизительно в два раза и составляет  $\delta(a)=\pm 2,1\%$ . При этом верхний предел пространственного диапазона измерения незначительно уменьшился с 0,99 до 0,93. Это изменение верхнего предела  $a$  можно считать незначительным.

*Оптимизация чувствительных элементов сдвоенного датчика второго конструктивного решения* (см. рис. 1,б). При исследовании были выявлены два возможных варианта сдвоенных датчиков с оптимизированными чувствительными элементами.

Первый вариант соответствует второму конструктивному решению (рис. 1,б) базового сдвоенного датчика, где первая пара чувствительных элементов является составной, состоящей из элементов 2+4 и 3+5. Поэтому оптимизированное решение чувствительных элементов в этом случае будет совпадать с решением для сдвоенного датчика первого конструктивного исполнения. С учетом этого

оптимальные размеры чувствительных элементов сдвоенного датчика второго конструктивного исполнения соответственно будут: для первого датчика  $\theta_{01}=90^\circ$  и  $\theta_{02}\leq 47^\circ$ ; для второго датчика  $\theta_{01}=47^\circ$  и  $\theta_{02}=0$ . В этом случае оптимальные графики погрешности сдвоенного датчика будут соответствовать графикам, представленным на рис. 4.

Во втором варианте второго конструктивного решения элементы 2-4 и 3-5 являются самостоятельными чувствительными элементами аналогично элементам 2-4 и 3-5 первого конструктивного решения. Оптимизировать целевую функцию будем по двум угловым размерам  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , соответствующим первой паре  $\theta_{01}=90^\circ$  и  $\theta_{02}=\theta_1$  и второй паре  $\theta_{01}=\theta_2$  и  $\theta_{02}=0$  чувствительных элементов. Примем исходным для второй пары чувствительных элементов угловые размеры  $\theta_2=45^\circ$  и  $\theta_{02}=0$ , а для первой пары  $\theta_{01}=90^\circ$  и  $\theta_{02}=\theta_1$ . Изменяя  $\theta_1$  от  $45^\circ$  до  $0^\circ$ , находим промежуточный минимум целевой функции  $\delta(a)$ , который наблюдается при  $\theta_1=40^\circ$ . Далее фиксируем  $\theta_1=40^\circ$  и начинаем изменять  $\theta_2$  от  $45^\circ$  до 0 и находим минимум целевой функции  $\delta(a)$ , который наблюдается при  $\theta_2=35^\circ$ . Таким образом, результаты оптимизации показывают, что минимальная погрешность сдвоенного датчика этого вида будет при угловых размерах первой пары чувствительных элементов, выполненной в форме сферического слоя  $\theta_{01}=90^\circ$  и  $\theta_{02}=40^\circ$ , и второй пары чувствительных элементов, выполненной в форме сферического сегмента  $\theta_{01}=35^\circ$  и  $\theta_{02}=0$ .

Графики оптимизированной погрешности  $\delta(a)$  и этой же погрешности для базового сдвоенного датчика представлены на рис. 5.

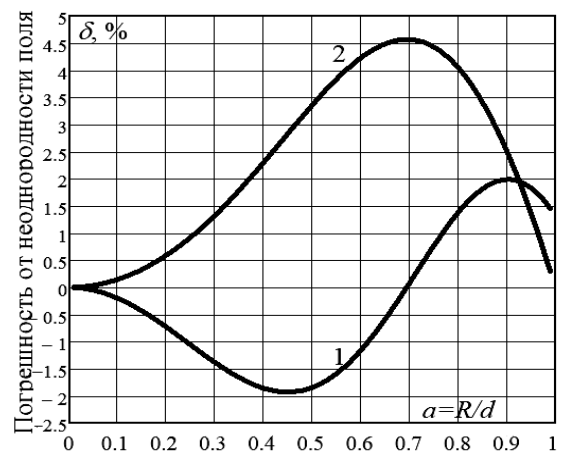


Рис. 5. Графики погрешности сдвоенного датчика с оптимизированными чувствительными элементами и базового датчика второго конструктивного решения



На рис. 5: 1 – погрешность датчика  $\delta(a)$  с оптимизированными чувствительными элементами; 2 – погрешность базового сдвоенного датчика.

Из сравнительного анализа графиков погрешности 1 и 2 (см. рис. 5) следует, что для сдвоенного датчика с оптимизированными чувствительными элементами погрешность датчика по сравнению с базовым датчиком уменьшилась приблизительно в два раза и составляет  $\delta(a) \leq \pm 2\%$  во всем пространственном диапазоне измерения  $a$ . Это наилучший результат из всех рассмотренных.

### Результаты исследований

Исследования двойных датчиков базового типа, проведенные в работе, позволили выявить конструктивные параметры датчиков и параметры взаимодействия датчиков с ЭП, влияющие на их погрешность в неоднородных полях. Составлена математическая модель сдвоенного датчика и определена целевая функция, оптимизация которой выявила конкретные параметры чувствительных элементов датчиков, позволяющие приблизительно в два раза уменьшить их погрешность. Это позволило предложить три варианта построения сдвоенных датчиков.

Первый вариант позволяет повысить точность измерения датчиков с накладными чувствительными элементами, первая пара которых имеет угловые размеры  $\theta_{01}=90^\circ$  и  $\theta_{02}=0$ , а вторая пара -  $\theta_{01}=47^\circ$ ,  $\theta_{02}=0$ . Датчик воспринимает НЭП с погрешностью  $\delta(a)=\pm 2,1\%$  в пространственном диапазоне  $0 \leq a \leq 0,93$ .

Второй вариант позволяет повысить точность измерения датчиков с составными чувствительными элементами, первая пара которых имеет угловые размеры  $\theta_{01}=90^\circ$  и  $\theta_{02} \geq 47^\circ$ , а вторая пара -  $\theta_{01}=47^\circ$ ,  $\theta_{02}=0$ . Датчик воспринимает НЭП с той же погрешностью и в том же пространственном диапазоне, что и датчик первого варианта.

Третий вариант позволяет повысить точность измерения датчиков с независимыми чувствительными элементами, первая пара которых имеет угловые размеры  $\theta_{01}=90^\circ$  и  $\theta_{02}=40^\circ$ , а вторая пара -  $\theta_{01}=35^\circ$ ,  $\theta_{02}=0$ . Датчик воспринимает НЭП с погрешностью  $\delta(a) \leq \pm 2\%$  во всем пространственном диапазоне измерения  $a$ . Все три варианта построения датчиков обеспечивают высокую точность измерения на расстояниях от источника поля, соизмеримых с радиусом основания датчика.

### Выводы и заключения

Предложены три конструктивных решения сдвоенных датчиков НЭП повышенной точности. Датчики пригодны для построения измерителей напряженности реальных электрических полей различной неоднородности.

### Литература

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем: В 2 х кн. М.: Мир, 1992. Кн. 1. 480 с.
2. Аш Ж. Датчики измерительных систем: В 2 х кн. М.: Мир, 1992. Кн. 2. 48 с.
3. Пронин А.Н., Сапожникова К.В., Тайманов Р.Е. Контроль достоверности информации, поступающей от датчиков // Датчики и системы. 2008. №8. С. 58-63.
4. Тайманов Р.Е., Сапожникова К.В. Метрологический самоконтроль датчиков // Датчики и системы. 2011. №2. С. 58-66.
5. Тайманов Р.Е., Сапожникова К.В. Проблемы интеллектуальных датчиков // Датчики и системы. 2004. №11. С. 50-58.
6. High sensitivity waveguide type hydrogen sensor/ K. Nishizawa, E. Sudo, M. Yoshida, T. Yamasaki // 4th Int. Conf. Optical Fibre Sensors. 1986. P.13
7. A pressure transducer using a metallic triple-beam tuning fork/ D.S. Randall, M.J. Rudkin, A. Cheshmehdoost, B.E. Jones // Sensors and Actuators A: Physical. 1997. Vol. 60. No. 1-3. P. 160-162.
8. Zhan Y., Sun Y. Closed-form impulse response model of non-line-of-sight single-scatter propagation // JOSA A. 2016. Vol. 33. No. 4. P. 752-757.
9. Шерстобитова А.С. Датчики физических величин. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 57 с.
10. Датчики: Справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. М.: Техносфера, 2012. 624 с.
11. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2006. 592 с.
12. Мисеюк О.П., Волченков В.И. Устройство предварительной обработки сигнала первичного преобразователя в датчике напряженности электрического поля // Датчики и системы. 2020. № 1 (243). С. 42-46. DOI: 1025728/datsys.2020.1.7.
13. Baicry M., Le Prado M. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of such a device. US Patent 0238646 A 1 filed February 17<sup>th</sup>, 2016; published August 18<sup>th</sup>, 2016.
14. A High Sensitivity Electric Field Microsensor Based on Torsional Resonance/ Zhaozhi Chu, Chunrong Peng, Ren Ren et al. // J. Sensor. MDPI. 2018. Jan. 19. DOI: 10.3390/s180102296.
15. Бирюков С.В. Физические основы измерения параметров электрических полей: монография. Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. 112 с.
16. Бирюков С.В. Измерения напряженности электрических полей в диэлектрических средах электроиндукционными датчиками. Методы и средства измерений: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 196 с.
17. Dongping Xiao. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement / Qichao Ma, Yutong Xie, Qi Zheng and Zhanlong Zhang // Sensors (Basel). 2018. Apr. 18(4): 1053. DOI: 10.3390/s18041053
18. Прибор для измерения напряженности электри-

ческого поля /В.И. Сукманов, В.И. Сафонов, А.Н. Ильин, М.Ю. Масленников //Электрические станции. 1987. № 6. С.69–71.

19. Берент Г.Н., Плейс И.Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. №6. С.141–142.

20. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines / S.V. Biryukov, F.G. Kaidanov, R.A. Kats, V.Ya. Lozhnikov // CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. 1986. Paris. 5 p.

21. Бирюков С.В., Ложников В.Я. Цифровой измеритель напряженности электрического поля промышленной частоты // Приборы и техника эксперимента. 1981. №1. С.275.

22. Датчики напряженности электростатического поля EP-600. Руководства, инструкции, описание для "Narda PMM EP-600, EP-601, EP-602, EP-603, EP-604 датчики напряженности поля": URL: <https://newpribor.ru/catalog/ispitatelnoe-oborudovanie/probniki-polya/narda-pmm-ep-600-ep601-ep-602.html> (дата обращения: 05.08.2019).

23. Бирюков С.В., Тюкина Л.В. Модернизированный метод измерения напряженности электрического

поля по среднему значению двоекными датчиками и устройства для его реализации // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 8. № 4. С. 83–92.

24. Пат. № 207464 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со двоекным датчиком: № 202111582: заявл. 23.04.2021; опубл. 28.10.2021 бюл. 31 / С.В. Бирюков, Л.В. Тюкина, Н.Г. Эйсмонт; заявитель Ом. гос. техн. ун-т. С.1-9

25. Пат. № 207465 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со двоекным датчиком: № 202111599: заявл. 23.04.2021; опубл. 28.10.2021; бюл. 31 / С.В. Бирюков, Л.В. Тюкина, В.В. Даньшина; заявитель Ом. гос. техн. ун-т. С.1-8

26. Бирюков С.В., Тюкина Л.В., Тюкин А.В. Двоекные сферические датчики напряженности низкочастотных электрических полей нового поколения // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67

27. Бирюков С.В., Тюкина Л.В., Тюкин А.В. Двоекный сферический датчик напряженности электрического поля // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 5. С. 85–91. DOI: 10.36622/VSTU.2021.15.5.012

Поступила 03.02.2022; принята к публикации 18.04.2022

#### Информация об авторах

**Бирюков Сергей Владимирович** - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Физика», Омский государственный технический университет (644050, Россия, г. Омск, пр-т Мира, д. 11); профессор кафедры «Физика и математика», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644080, Россия, г. Омск, проспект Мира, 5), тел.: (3812) 65-02-18, +79081066078, e-mail: sbiryukov154@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-9911>

**Тюкин Александр Владимирович** - канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика и математика», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644080, Россия, г. Омск, проспект Мира, 5), e-mail: tyukin\_av@mail.ru, тел.: (3812) 65-02-18, +79831101529, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-3797>

**Тюкина Людмила Владимировна** - преподаватель, Омский промышленно-экономический колледж (644029, Россия, г. Омск, Нефтезаводская, 6), тел.: (3812) 67-04-92, +79095361782, e-mail: lyudmila.omsk@mail.ru

## DUAL TYPE OF ELECTRIC FIELD SENSORS OF INCREASED ACCURACY

S.V. Biryukov<sup>1,2</sup>, A.V. Tyukin<sup>2</sup>, L. V. Tyukina<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>2</sup> Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

<sup>3</sup> Omsk Industrial and Economic College, Omsk, Russia

**Abstract:** the article analyzes the basic dual spherical electro-induction sensors of electric field strength in order to identify their design parameters and parameters of the interaction of sensors with the EP, affecting the error of its perception. We carried out optimization of the sensor's sensitive elements in order to identify the minimum error and the maximum of its spatial measurement range, in which its minimum error is ensured. Optimization made it possible to reduce the error of the basic sensors by approximately two times, i.e. from  $\pm 4.6\%$  to  $\pm 2\%$  and to offer three possible variants of the implementation of the sensitive elements of dual sensors. In the first variant, the angular size  $\theta_{01}$  of the second pair of sensing elements is increased from  $45^\circ$  to  $47^\circ$ . This made it possible to reduce the sensor error to  $\pm 2.1\%$  at the upper limit of the spatial measurement range  $a = 0.93$ . In the second variant, the angular size  $\theta_{02}$  of the first pair of sensing elements is increased from  $45^\circ$  to  $47^\circ$ , with a constant size  $\theta_{01}=90^\circ$  of the same pair, and the angular size  $\theta_{01}$  of the second pair of sensing elements is also increased from  $45^\circ$  to  $47^\circ$ . This made it possible to reduce the error of the second version of the sensor to  $\pm 2.1\%$  at the upper limit of the spatial measurement range  $a = 0.93$ . In the third version, the angular size  $\theta_{02}$  of the first pair of sensing elements was reduced from  $45^\circ$  to  $40^\circ$ , with a constant size  $\theta_{01}=90^\circ$  of the same pair, and the angular size  $\theta_{01}$  of the second pair of sensing elements was reduced from  $45^\circ$  up to  $35^\circ$ . At the same time, the sensor error in the entire spatial range does not exceed  $\pm 2\%$ . Using dual sensors of three versions, it is possible to achieve a significant increase in the accuracy of measuring the strength of inhomogeneous EP in a wide spatial measurement range compared to basic sensors, while the third option is preferable

**Key words:** electric field strength sensor, dual sensor, dual sensor, electric field strength, field inhomogeneity error

## References

1. Ash J. "Sensors of measuring systems" ("Datchiki izmeritel'nykh sistem"), in 2 books, book. 1, Moscow: Mir, 1992, 480 p.
2. Ash J. "Sensors of measuring systems" ("Datchiki izmeritel'nykh sistem"), in 2 books, book. 2, Moscow: Mir, 1992, 48 p.
3. Pronin A.N., Sapozhnikova K.V., Taymanov P.E. "Control of reliability of information coming from sensors", *Sensors and Systems*, 2008, no. 8, pp. 58-63.
4. Taymanov P.E., Sapozhnikova K.V. "Metrological self-control of sensors", *Sensors and Systems*, 2011, no. 2, pp. 58-66.
5. Taymanov P.E., Sapozhnikova K.V. "Problems of intelligent sensors", *Sensors and Systems*, 2004, no. 11, pp. 50-58.
6. Nishizawa K., Sudo E., Yoshida M., Yamasaki T. "High sensitivity waveguide type hydrogen sensor", *4th Int. Conf. Optical Fiber Sensors*, 1986, pp. 13.
7. Randall D.S., Rudkin M.J., Cheshmchdoost A., Jones V.E. "A pressure transducer using a metallic triple-beam tuning fork", *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, vol. 60, no. 1-3, pp. 160-162.
8. Zhan Y., Sun Y. "Closed-form impulse response model of non-line-of-sight single-scatter propagation", *JOSA A*, 2016, vol. 33, no. 4, pp. 752-757.
9. Sherstobitova A.S. "Sensors of physical quantities" ("Datchiki fizicheskikh velichin"), St. Petersburg: ITMO University, 2017, 57 p.
10. Sharapova V.M., Polishchuk E.S. "Sensors" ("Datchiki"), reference manual, Moscow: Tekhnosfera, 2012, 624 p.
11. "Modern sensors" ("Sovremennye datchiki"), directory, Moscow: Tekhnosfera, 2006, 592 p.
12. Miseyuk O.P., Volchenkov V.I. "Device for preliminary signal processing of the primary transducer in the electric field strength sensor", *Sensors and Systems*, 2020, no. 1 (243), pp. 42-46. DOI: 10.25728/datsys.2020.1.7.
13. Baicry M., Le Prado M. "Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of such a device", US patent 0238646 A 1 filed February 17th, 2016, published August 18th, 2016.
14. Zhaozhi Chu, Chunrong Peng, Ren Ren et al. "A high sensitivity electric field microsensor based on torsional resonance", *J. Sensor. MDPI*, Jan. 2018 19, DOI: 10.3390/s180102296.
15. Biryukov S.V. "Physical foundations for measuring the parameters of electric fields" ("Fizicheskie osnovy izmereniya parametrov elektricheskikh poley"), monograph, Omsk: SibADI, 2008, 112 p.
16. Biryukov S.V. "Measurements of the intensity of electric fields in dielectric media by electroinductive sensors. Methods and means of measurements" ("Izmereniya napryazhennosti elektricheskikh poley v dielektricheskikh sredakh elektroinduktsionnymi datchikami. Metody i sredstva izmereniy."), monograph, Omsk: OmGTU, 2011, 196 p.
17. Dongping Xiao, Qichao Ma, Yutong Xie, Qi Zheng, Zhanlong Zhang "A power-frequency electric field sensor for portable measurement", *Sensors (Basel)*, 2018 Apr., no. 18(4), pp. 1053, DOI: 10.3390/s18041053
18. Sukmanov V.I., Safonov V.I., Il'in A.N., Maslennikov M.Yu. "Device for measuring the electric field strength", *Electric Stations*, 1987, no. 6, pp. 69-71.
19. Berent G.N., Place I.R. "Electric field sensor", *Instruments for Scientific Research*, 1971, no. 6, pp. 141-142.
20. Biryukov S.V., Kaydanov F.G., Kats R.A., Lozhnikov V.Ya. "Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substances and near transmission lines", *CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, Report 36-06, Session 27th August-4th September, 1986 Paris, 5 p.
21. Biryukov S.V., Lozhnikov V.Ya. "Digital meter of electric field intensity of industrial frequency", *Instruments and Experimental Technique (Pribory i tekhnika eksperimenta)*, 1981, no. 1, p. 275.
22. "Electrostatic field strength sensors EP-600. Manuals, instructions, description for "Narda PMM EP-600, EP-601, EP-602, EP-603, EP-604 field strength sensors", available at: <https://newpribor.ru/catalog/ispitatelnoe-oborudovanie/probniki-polya/narda-pmm-ep-600-ep601-ep-602>.html (date of access: 08.05.2019).
23. Biryukov S.V., Tyukina L.V. "Upgraded method for measuring the electric field intensity by the average value with dual sensors and devices for its implementation", *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin)*, 2021, vol. 8, no. 4, pp. 83-92.
24. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Eismont N.G. "Device for measuring electric field strength with a dual sensor" ("Ustroystvo dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya so sdvoennym datchikom"), patent 207464 U1 Russian Federation, IPC G01R 29/12, No. 202111582, Appl. 04/23/2021, publ. 28.10.2021, bul. 31, pp. 1-9.
25. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Danshina V.V. "Device for measuring electric field strength with a dual sensor" ("Ustroystvo dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya so sdvoennym datchikom"), patent 207465 U1 Russian Federation, IPC G01R 29/12, no. 202111599, Appl. 04/23/2021, publ. 10/28/2021, bul. 31, pp. 1-8.
26. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Tyukin A.V. "Dual spherical sensors for the intensity of low-frequency electric fields of a new generation", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2021, no. 5 (179), pp. 62-67, DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67.
27. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Tyukin A.V. "Dual spherical electric field intensity sensor", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 5, pp. 85-91, DOI: 10.36622/VSTU.2021.15.5.012

Submitted 03.02.2022; revised 18.04.2022

## Information about the authors

**Sergey V. Biryukov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University (11 Prospekt Mira, Omsk 644050, Russia); Professor, Siberian State Automobile and Highway University (5 Prospekt Mira, Omsk 644080, Russia), tel.: +7 (3812) 65-02-18, +79081066078, e-mail: sbiryukov154@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-9911>

**Aleksandr V. Tyukin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Siberian Automobile and Highway University (5 Prospekt Mira, Omsk 644080, Russia), e-mail: tyukin\_av@mail.ru, tel.: +7(3812) 65-02-18, +79831101529, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-3797>

**Lyudmila V. Tyukina**, Assistant Professor, Omsk Industrial and Economic College (6 Neftezhavodskaya str., Omsk 644029, Russia), tel.: +7(3812) 67-04-92, +79095361782, e-mail: lyudmila.omsk@mail.ru

**ОСОБЕННОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ТИПА «ПОРЫ» В СТАЛЬНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ****М.Н. Давыдов, С.В. Сафонов, В.В. Шурупов****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** данная работа посвящена вопросу особенностей выявления дефектов типа «поры» в стальных сварных соединениях, выполненных с полным проваром корня шва. Рассмотрены классификация дефектов, причины возникновения, а также их влияние на работоспособность детали или конструкции. Описаны факторы, которые снижают вероятность выявления данного типа несплошности ультразвуковым методом контроля, в частности, эхо-импульсным методом. В качестве исследуемого объекта использовались сварные соединения из Стали 20 с номинальной толщиной свариваемых элементов – 12 мм. В данных образцах по результатам радиографического контроля выявлены недопустимые внутренние дефекты в виде пористости, скоплений и цепочек пор. Целью эксперимента ставилась задача определить возможность выявления подобных дефектов ультразвуковым методом контроля. Представлено применяемое оборудование и описана методика проведения эксперимента. Определены режимы контроля, сканирования и выбраны размеры контрольных отражателей в настроечном образце, которые имитируют естественный дефект в изделии, соответственно, их размер эквивалентен максимально допустимому одиночному дефекту в объекте контроля. В ходе проведения ультразвукового контроля внутренние поры были зафиксированы, но амплитуда эхо-сигнала от данных дефектов была значительно ниже браковочного уровня чувствительности. Результаты были занесены в таблицу и построен график обнаруженных индикаций относительно уровней чувствительности. Ни одна из обнаруженных при радиографическом контроле индикаций не превысила контрольный уровень чувствительности, т.е. уровень фиксации

**Ключевые слова:** сварные соединения, дефекты, контроль неразрушающий, контроль ультразвуковой

**Введение**

Сварка – это процесс создания неразъемных соединений. Сварные соединения являются неотъемлемой частью различных конструкций и изделий машиностроительных производств.

В процессе изготовления и эксплуатации изделий в металле могут возникать дефекты, влияющие на прочность и эксплуатационную надежность сварных соединений.

Своевременное обнаружение внутренних дефектов при изготовлении деталей возможно с применением методов неразрушающего контроля (НК), например, радиографического (РК) или ультразвукового (УК).

Целью данной работы является рассмотрение возможностей, особенностей и ограничений обнаружения дефектов типа «поры» ультразвуковым методом контроля.

**Дефект типа «ПОРЫ»**

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012 «Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в

металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением» [1], термин «дефект» - это несплошность в сварном соединении или отклонение от требуемой геометрии, а «недопустимый дефект» - дефект, превышающий норму.

В классификации дефектов поры относятся к группе № 2 – Полости [1]. Газовая пора (2011) – это газовая полость практически сферической формы (рис. 1). Может располагаться в наплавленном металле равномерно (2012), а также в виде скоплений (2013) и цепочками (линейная пористость - 2014). Поры могут быть как округлой, так и вытянутой формы, размеры которых достигают нескольких миллиметров.

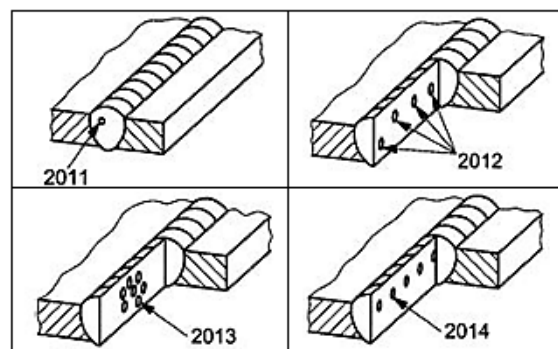


Рис. 1. Классификация дефектов



Причины образования пор в сварных соединениях разнообразны. Начиная от качества зачистки свариваемых кромок, большой скорости сварки, когда газы не успевают выйти наружу, заканчивая повышенным содержанием углерода в металле и присадочном материале. Также могут влиять условия окружающей среды, например, повышенная влажность, которая отражается на состоянии электродных покрытий флюса и т.д.

Пористость в сварных соединениях может влиять на герметичность и механические свойства изделия, например, снижение прочности, ударной вязкости и т.п. Наиболее точная оценка влияния дефектов на работоспособность изделия определяется экспериментально, путем испытаний образцов с дефектами.

Установлено, что суммарная площадь поры до 5-10% в сечении сварного соединения практически не влияет на статическую прочность [2]. Каждая пора отдельно в общем случае не опасна, то есть не вносит существенных изменений в ожидаемые характеристики изделия. Но в процессе изготовления могут образовываться скопления удлиненных пор (канальных и «червячных»), которые являются наиболее опасными (рис. 2).

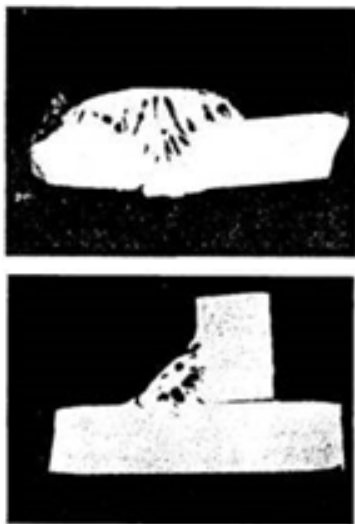


Рис. 2. Канальные поры

В стыковых соединениях встречаются «червячные поры» диаметром 0,5 - 3,1 мм, расположенные вертикально в средней и подповерхностной части наплавленного металла и длиной до 9 мм [3].

Влияние дефектов на работоспособность детали или конструкции определяется многими факторами, например, условиями эксплуатации и нагрузок. Это во многом зависит от характера

дефектов – их типа, размеров, формы, расположения. Следовательно, наличие в сварном соединении скоплений и цепочек пор может привести к резкому снижению прочности изделия за счет уменьшения площади поперечного сечения.

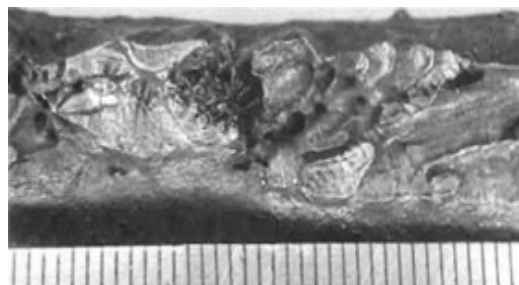


Рис. 3. Червячные поры в разрушенном сварном соединении

Учитывая частоту образования подобных дефектов и влияние на несущую способность, необходимо учитывать возможность их достоверного обнаружения и устранения на стадии производства, до ввода контролируемого объекта в эксплуатацию.

#### Особенности выявления дефекта типа «поры» ультразвуковым методом

Дефекты типа «поры», занимающие значительный объем в сварном соединении, могут быть своевременно не выявлены ультразвуковым контролем, в частности эхо-импульсным методом.

Это связано с тем, что ультразвуковой контроль основан на оценке отражающей способности дефектов, а не их фактических размеров (рис. 4) [4].

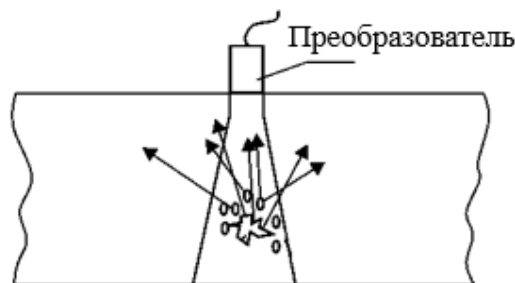


Рис. 4. Рассеяние акустической энергии на дефекте типа «поры»

Поверхность «червячной поры» имеет нерегулярные рельефные и игольчатые отражатели, что вызывает сильное рассеивание ультразвуковых волн (рис. 5).

Поры характеризуются наличием на экране дефектоскопа импульсов, быстро исчезающих и появляющихся вновь при незначительных смещениях преобразователя.

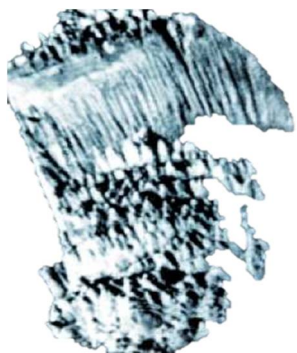


Рис. 5. Вид отражающей поверхности поры

В ряде исследований и практических работах говорится, что скопления пор или шлаковых включений дают на экране один эхо-сигнал или характеризуются появлением широкого эхо-сигнала неопределенной формы.

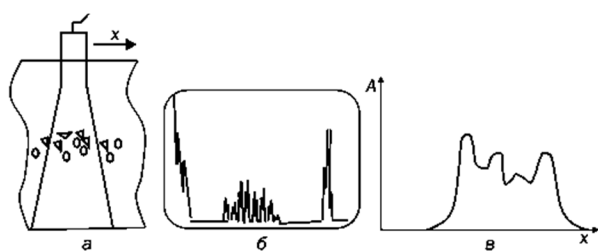


Рис. 6. Скопление пор

На рис. 6 представлен вид экрана при контроле изделия с объемными дефектами типа пор:

- а – скопление пор в сечении объекта контроля;
- б – вид экрана ультразвукового дефектоскопа при выявлении скопления;
- в – динамика изменения амплитуды эхо-сигнала при перемещении преобразователя в направлении  $X$ .

Допустимость обнаруженных несплошностей [5] во многих случаях определяется путем сравнения их амплитуды с амплитудой эхо-сигнала от эталонного отражателя (искусственного дефекта) в настроенном образце.

Как было сказано ранее, отражающая поверхность поры вызывает рассеивание ультразвуковых волн. Это приводит к тому, что получаемая приемником отраженная энергия и амплитуда эхосигнала – намного меньше, чем от эталонного отражателя.

Следовательно, несплошность может считаться допустимой и непротяженной, даже в не-

которых случаях не доходить до уровня фиксации, хотя ее реальные размеры намного больше. В результате снижается достоверность и объективность результатов ультразвукового контроля.

### Проведение эксперимента

В качестве исследуемого объекта будут использоваться сварные соединения с полным проваром, выполненные ручной дуговой сваркой с V-образной разделкой С17 по ГОСТ 5264-80 (рис. 7) [6].

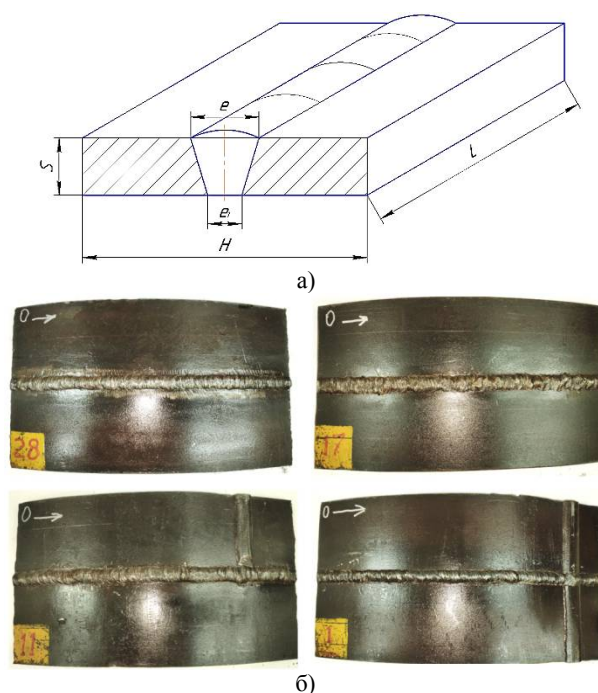


Рис. 7. Исследуемые образцы: а) эскиз сварного соединения, б) вид исследуемых образцов

Номинальная толщина свариваемых элементов – 12,0 мм, марка материала – Сталь 20, шероховатость поверхности сканирования – 40 мкм.

Для проведения эксперимента был выбран ультразвуковой дефектоскоп УСД-50 IPS (рис. 8), выпускаемый отечественным производителем НПЦ «КРОПУС» (г. Ногинск).



Рис. 8. Ультразвуковой дефектоскоп УСД-50 IPS

Данный дефектоскоп позволяет работать в «классическом» одноэлементном режиме с диапазоном частот от 0,25 до 20 МГц. Также возможно подключение датчика пути для построения В-скана и работы в режиме TOFD (Time Of Flight Diffraction - Дифракционно-временной метод). Его технические характеристики позволяют выполнить поставленную задачу.

В ходе эксперимента настройка чувствительности и порядок проведения ультразвукового контроля выполнялись в соответствии с действующей нормативно-технической документацией по ГОСТ Р 55724-2013 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые» [7].

Сварные соединения контролировались эхо-методом по совмещенной схеме, с использованием преобразователей поперечных волн, рабочей частотой 5 МГц, углами ввода 65 и 70 градусов.

Сварной шов контролируется с двух сторон (1 проход – справа, 2 проход - слева). Корень шва проверяется прямым лучом, верхняя часть – однократно-отраженным (рис. 9).

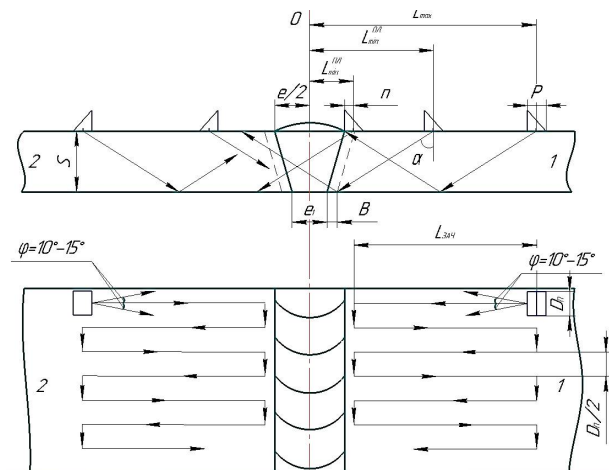


Рис. 9. Схема контроля

Перемещение преобразователя выполняется параллельно оси шва с одновременным возвратно-поступательным перемещением перпендикулярно оси, так называемое – поперечно-продольное сканирование [7]. Шаг сканирования не должен превышать половины размера активного элемента преобразователя ( $D_n$ ) в направлении шага (рис. 9).

Во время сканирования необходимо поворачивать преобразователь на угол  $\varphi = 10...15^\circ$  относительно линии поперечного перемещения (рис. 9), это позволяет повысить вероятность выявления различно ориентированных дефектов.

Настройка браковочного уровня чувствительности производится по настроечному образцу (НО) (рис. 10), изготовленному из материала того же структурного класса, что и объект контроля. Это уменьшает разницу в скорости и затухании ультразвуковой волны.

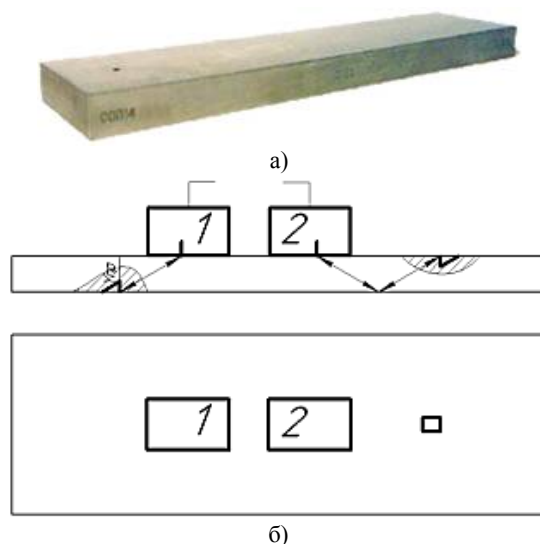


Рис. 10. Настроечный образец: а) общий вид, б) расположение преобразователя при настройке чувствительности (положение 1 – прямой луч, положение 2 – однократно-отраженный луч)

Настроечный образец представляет собой плоскую пластину той же толщины, что и объект контроля. В нем имеются плоские угловые отражатели типа «зарубка», размеры которых устанавливаются требованиями нормативно-технической документации на объект контроля.

Искусственные отражатели имитируют естественный дефект в изделии, соответственно их размер эквивалентен максимально допустимому одиночному дефекту в объекте контроля.

Для настройки были выбраны отражатели с наименьшими размерами из действующей



нормативно-технической документации, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Размеры искусственных отражателей  
в настроечном образце

Тип сварного соединения	Номинальная толщина, мм	Размер отражателя, мм
Стыковое	12,0	2,0 × 1,5
		2,0 × 1,8
		2,0 × 2,0

Стоит заметить, что проведение контроля с оценкой качества возможно при наличии документации, содержащей нормы допустимости дефектов. В общем случае назначение норм - гарантировать необходимые прочностные свойства сварных соединений и оказывать дисциплинирующее воздействие на технологию сварки.



а)



б)

Рис. 11. Результат настройки ультразвукового дефектоскопа с помощью НО методом ВРЧ: а) эхосигнал от отражателя прямым лучом, б) эхосигнал от отражателя однократно-отраженным лучом

## Результаты исследования

Выбранные сварные соединения были проверены радиографическим методом контроля. В результате расшифровки радиографических снимков в образцах были выявлены не-

допустимые дефекты в виде пористости, скоплений и цепочек пор (рис. 13).

На снимке скопления пор представляют собой темные пятна правильной или вытянутой формы, расположенные компактно.

В ходе проведения ультразвукового контроля внутренние поры были зафиксированы, но амплитуда эхо-сигнала от данных дефектов была значительно ниже браковочного уровня чувствительности (до 6 раз).

Результаты были занесены в таблицу (рис. 12) и построен график обнаруженных индикаций относительно уровней чувствительности:

- браковочного – при котором принимается решение об отнесении выявленной несплошности к классу «дефект»;
- контрольного (уровень фиксации) – при котором несплошности регистрируются и производится оценка их допустимости по условным размерам и количеству;
- поисковый – этот уровень устанавливается при поиске несплошностей [7].

Номер индикации	Номер прохода	Координаты индикации, мм			Длина индикации ΔL±5, мм	Амплитуда относительно браковочного уровня ΔA±2, дБ	Тип
		Расстояние от точки отсчета Z±5	Глубина Y±2	Расстояние от центра шва X±2			
1	1	2	11,2	-5,6	17	-17,0	-/-
2	1	39	8,4	0,1	12	-17,0	-/-
3	1	235	11,1	4,5	15	-16,0	-/-
4	1	298	11,8	3,5	10	-12,0	-/-
5	1	375	7,3	-0,9	15	-9,0	-/-
6	1	21	10,1	5,3	10	-16,0	-/-
7	1	37	5,0	1,0	9	-17,0	-/-
8	1	70	11,3	-1,5	9	-20,0	-/-
9	1	108	10,3	-5,8	19	-20,0	-/-
10	2	289	3,5	0,3	17	-17,0	-/-

а)

Номер индикации	Номер прохода	Координаты индикации, мм			Длина индикации ΔL±5, мм	Амплитуда относительно браковочного уровня ΔA±2, дБ	Тип
		Расстояние от точки отсчета Z±5	Глубина Y±2	Расстояние от центра шва X±2			
1	1	0	11,2	-5,6	15	-18,0	-/-
2	1	38	8,4	0,1	12	-18,0	-/-
3	1	235	11,1	4,5	15	-17,0	-/-
4	1	300	11,8	3,5	10	-13,0	-/-
5	1	375	7,3	-0,9	15	-10,0	-/-
6	1	20	10,1	5,3	10	-15,0	-/-
7	1	37	4,8	1,0	8	-16,0	-/-
8	1	70	11,3	-1,5	9	-19,0	-/-
9	1	110	10,3	-5,8	17	-22,0	-/-
10	2	290	3,4	0,3	15	-19,0	-/-

б)

Номер индикации	Номер прохода	Координаты индикации, мм			Длина индикации ΔL±5, мм	Амплитуда относительно браковочного уровня ΔA±2, дБ	Тип
		Расстояние от точки отсчета Z±5	Глубина Y±2	Расстояние от центра шва X±2			
1	1	3	11,2	-5,6	14	-19,0	-/-
2	1	40	8,4	0,1	12	-19,0	-/-
3	1	235	11,1	4,5	15	-18,0	-/-
4	1	300	11,8	3,5	10	-14,0	-/-
5	1	378	7,3	-0,9	15	-11,0	-/-
6	1	20	10,2	5,4	8	-20,0	-/-
7	1	37	4,8	1,0	7	-21,0	-/-
8	1	70	11,3	-1,5	9	-24,0	-/-
9	1	110	10,3	-5,8	15	-24,0	-/-
10	2	290	3,4	0,3	14	-21,0	-/-

в)

Рис. 12. Результаты измерений с использованием при настройке контрольного отражателя: а) 2,0 × 1,5 мм, б) 2,0 × 1,5 мм, в) 2,0 × 2,0 мм

Для построения графика выбраны 10 результатов контроля, с тремя настройками чувствительности в соответствии с табл. 1.

Из графика видно, что только одна индикация № 5 превысила поисковый уровень (ниже браковочного в 4 раза) (рис. 14).



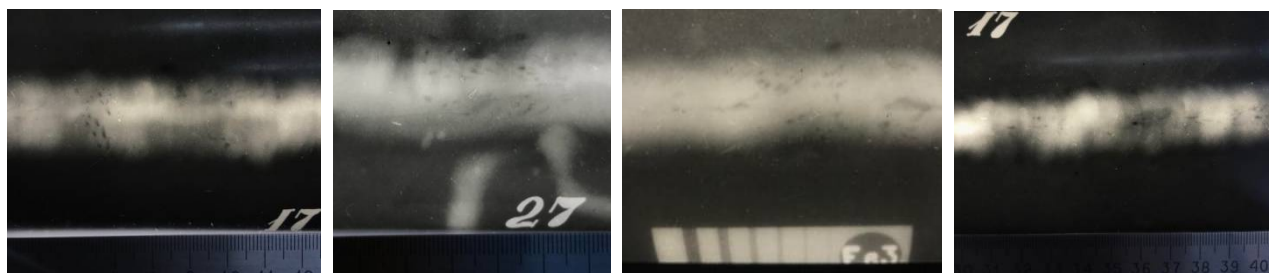


Рис. 13. Результаты радиографического контроля

Ни одна из обнаруженных при радиографическом контроле индикация не превысила контрольный уровень чувствительности, т.е. уровень фиксации.

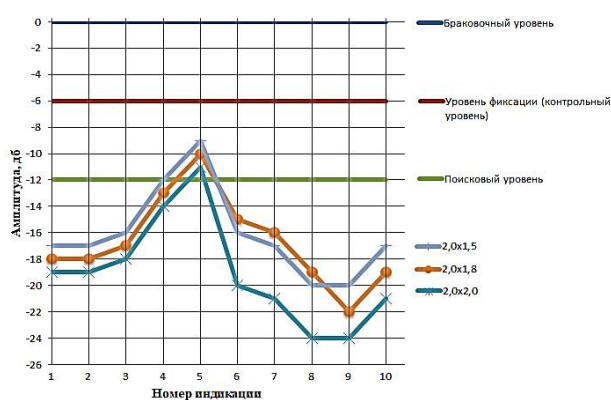


Рис. 14. График зависимости амплитуд найденных отражателей относительно браковочного, контрольного и поискового уровней чувствительности

Амплитуда от нескольких отражателей на 24 дБ ниже браковочного уровня чувствительности, практически на уровне шумов.

### Вывод

До ввода изделия в эксплуатацию важно оценить его качество, а также допустимость обнаруженных несплошностей. Значения допустимости, в общем случае, указаны в нормативно-технической документации либо иных документах на изготовление или контроль.

После проведенного эксперимента можно сделать вывод, что с используемыми нормами максимально допустимых дефектов не представляется возможным объективно оценить качество сварного соединения. То есть в ряде случаев регламентированный размер «безопасного дефекта» может оказаться неестественно большим.

Решить данную проблему возможно путем увеличения достоверности ультразвукового контроля. Необходимо определить режимы, при которых обнаружение подобных дефектов будет максимальным.

Повысить вероятность обнаружения подобных дефектов возможно при помощи настроечных образцов из фрагментов сварных соединений, с искусственными дефектами, имитирующими рельефную отражающую поверхность и локализованными в зоне возможного возникновения, это позволит объективнее оценить обнаруженный дефект.

При помощи подобных образцов можно сузить зону контроля и сфокусироваться в подповерхностной и средней части сварного соединения, а также вводить поправки чувствительности с учетом неровной отражающей поверхности несплошности.

### Литература

1. ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012 «Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Ч. 1: Сварка плавлением. М.: Стандартинформ, 2014. 36 с.
2. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. М.: «Высш. шк.», 1991. 281 с.
3. Коновалов Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. М., 2012. 132 с.
4. Кретов Е.Ф. Особенности ультразвукового контроля стальных отливок // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 2 (52). С. 13-14.
5. ГОСТ Р ИСО 5577-2009 Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь. М.: Стандартинформ, 2011. 32 с.
6. ГОСТ 5264-80 Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Стандартинформ, 2019. 37 с.
7. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Стандартинформ, 2014. 29 с.

Поступила 14.02.2022; принята к публикации 19.04.2022

Информация об авторах

**Давыдов Максим Николаевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ndtesting0@gmail.com

**Сафонов Сергей Владимирович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kafedra-ao@mail.ru

**Шурупов Владимир Викторович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: shurupov.svarka@yandex.ru

**DETECTING DEFECTS OF THE "PORES" TYPE IN STEEL WELDED JOINTS**

**M.N. Davydov, S.V. Safonov, V.V. Shurupov**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the work is devoted to the issue of detection of defects such as "pores" in steel welded joints made with full penetration of the root of the weld. We considered the classification of defects, the causes of their occurrence, as well as their influence on the performance of a part or structure. We described the factors that reduce the probability of detecting this type of discontinuity by ultrasonic testing, in particular, by the echo-pulse method. Welded joints made of Steel 20 with a nominal thickness of welded elements of 12 mm were used as the object under study. In these samples, according to the results of radiographic control, unacceptable internal defects were revealed in the form of porosity, accumulations and chains of pores. The purpose of the experiment was to determine the possibility of detecting such defects by ultrasonic testing. We describe the equipment used and the methodology for conducting the experiment. We determined the modes of control, scanning and selected the dimensions of the control reflectors in the tuning sample, which imitate a natural defect in the product, respectively, their size is equivalent to the maximum allowable single defect in the test object. During the ultrasonic testing, internal pores were fixed, but the amplitude of the echo signal from these defects was significantly lower than the rejection sensitivity level. We tabulated the results and plotted the indications found against sensitivity levels. None of the indications found during radiographic control exceeded the control level of sensitivity, i.e. fixation level

**Key words:** welded joints, defects, non-destructive testing, ultrasonic testing

**References**

1. GOST R ISO 6520-1-2012 "Welding and allied process. Classification of geometric imperfection in metallic materials. Part 1: Fusion welding", Moscow, 2014, 36 p.
2. Aleshin N.P., Sherbinskiy V.S. "Radiation, ultrasonic and magnetic flaw detection of metal products" ("Radiatsionnaya, ul'trazvukovaya i magnitnaya defektoskopiya metalloizdeliy"), Moscow: Vysshaya shkola, 1991, 281 p.
3. Konovalov N.N. "Rationing of defects and reliability of non-destructive testing of welded joints" ("Normirovanie defektov i dostovernost' nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedineniy"), Moscow, 2015, 88 p.
4. Kretov E.F. "Features of steel casting ultrasonic inspection", *NDT World Review (V mire nerazrushayushchego kontrolya)*, 2011, no. 2 (52), pp. 13-14.
5. GOST R ISO 5577-2009 "Non-destructive testing. Ultrasonic inspection. Vocabulary", Moscow, 2011, 32 p.
6. GOST 5264-80 "Manual arc welding. Welding joints. Main types, design elements and dimensions", Moscow, 2019, 37 p.
7. GOST R 55724-2013 "Non-destructive testing. Welded joints. Ultrasonic methods", Moscow, 2014, 29 p.

Submitted 14.02.2022; revised 19.04.2022

**Information about the authors**

**Maksim N. Davydov**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ndtesting0@gmail.com

**Sergey V. Safonov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kafedra-ao@mail.ru

**Vladimir V. Shurupov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: shurupov.svarka@yandex.ru

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

А.Ю. Боташев, Р.А. Байрамуков, А.А. Айбазов

Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Россия

**Аннотация:** разработано устройство, предназначенное для использования в мелкосерийных производствах для штамповки листовых деталей из высокопрочных сплавов. Штамповка осуществляется давлением продуктов сгорания газообразного топлива. Устройство содержит рабочий цилиндр с поршнем и две камеры сгорания: основную и дополнительную. Конструктивной особенностью данного устройства является наличие между рабочим цилиндром и камерой сгорания плиты, содержащей сквозные отверстия и обратный клапан. Благодаря этому в камере сгорания осуществляется сжатие энергоносителя и его сгорание, в результате чего генерируется газ давлением до 60 МПа и температурой 2100...2200 °С, который производит деформирование заготовки. В процессе штамповки происходит также сжатие продуктов сгорания в полости матрицы, что способствует предотвращению разрыва заготовки. Кроме того, за счет их сжатия температура в полости матрицы интенсивно увеличивается и достигает 2600...2680 °С. Благодаря этому осуществляется быстрый нагрев заготовки, что, обеспечивая существенное повышение ее пластичности, облегчает штамповку деталей сложной формы. Путем анализа рабочего процесса устройства штамповки проведена оптимизация его конструктивных параметров, обеспечивающая при данном давлении энергоносителя достижение максимального давления газа, действующего на штампуемую заготовку. В частности найдены оптимальные соотношения объемов рабочего цилиндра и камеры сгорания, а также соотношение объемов камер сгорания. Данное устройство позволяет штамповать широкий ассортимент деталей из высокопрочных малопластичных сплавов

**Ключевые слова:** устройства газовой штамповки, штамповка малопластичных сплавов

### Введение

Большое количество деталей машин и аппаратов производят из листовых заготовок, используя листовую штамповку [1]. Для производства листовых деталей все большее применение находят высокопрочные стали и сплавы алюминия, титана, никеля, вольфрама, молибдена и других металлов [2, 3]. В условиях мелкосерийных производств, в частности в авиастроении и космической отрасли, для снижения себестоимости производства таких деталей применяют импульсные методы штамповки [4, 5]. Многие виды высокопрочных сплавов имеют низкую пластичность, поэтому детали из таких сплавов штампуют с нагревом заготовки [6, 7]. При этом нагрев листовой заготовки осуществляют непосредственно в полости матрицы электроконтактным способом [8], воздействием токов высокой частоты [9] или нагретого инертного газа [10]. Для штамповки листовых деталей с нагревом заготовки более рентабельно применение газовой штамповки [11, 12], использующей дешевые энергоносители. Однако мощность известных конструкций устройств газовой штамповки недостаточна для штамповки широкой номенклатуры деталей из высокопрочных сплавов.

Целью данной работы является разработка мощного устройства, позволяющего штамповать большую номенклатуру деталей из листовых заготовок высокопрочных сплавов. Задачами для ее осуществления являются: разработка устройства газовой штамповки, создающего на обрабатываемой заготовке давление газа до 60 МПа и оптимизация конструктивных параметров этого устройства путем исследования его рабочего процесса.

### Конструкции и работа устройства газовой штамповки

Устройство содержит матрицу 3, рабочий цилиндр 8 с поршнем 9 и две камеры сгорания: основную 7 и дополнительную 10 (рис. 1). Конструктивной особенностью данного устройства от известного устройства [12] является наличие между рабочим цилиндром 8 и камерой сгорания 7 плиты 19, содержащей отверстия 20 и обратный клапан 21.

Матрица 3, цилиндр 8 и камеры 7, 10 наполняются топливной смесью. Сначала зажигается смесь в камере 10. При этом поршень 9 перемещается и вытесняет топливную смесь из цилиндра 8 в камеру 7, что обеспечивает многократное увеличение давления смеси. После этого производится зажигание топливных смесей в камере сгорания 7 и полости 4 матрицы 3. Образующиеся при этом продукты

сгорания осуществляют нагрев и деформирование обрабатываемой заготовки.

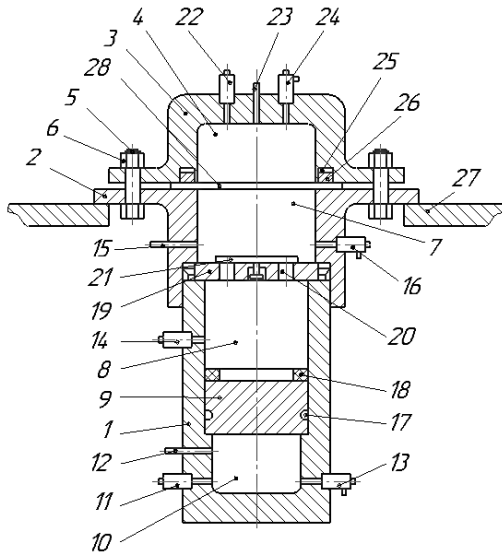


Рис. 1. Устройство газовой штамповки: 1, 2 – части корпуса; 3, 4 – матрица и ее полость; 5 – болт; 6 – гайка; 7 – камера сгорания; 8 – рабочий цилиндр; 9 – поршень; 10 – дополнительная камера сгорания; 11, 14, 22 – впускные клапаны; 12, 15, 23 – свечи зажигания; 13, 16, 24 – выпускные клапаны; 17 – уплотнение; 18 – эластичная шайба; 19 – плита; 20 – отверстия; 21 – обратный клапан; 25 – кольцевая полость; 26 – кольцевой прижим; 27 – опора; 28 – заготовка

### Исследование термодинамических процессов штамповочного устройства

В камерах сгорания и рабочем цилиндре данного устройства совершается ряд термодинамических процессов. Рассмотрим эти процессы для определения основных параметров рабочей среды.

В процессе горения газовой смеси в камере 10 его объем существенно не изменяется, поэтому давление продуктов сгорания в ней можно определить как [9]

$$P_z = \lambda P_c, \quad (1)$$

где  $P_c$  – давление топливной смеси, Па;

$\lambda$  – степень повышения давления при сгорании в постоянном объеме,  $\lambda = 7 \dots 8,5$ , осредненную величину  $\lambda$  примем равным 7,6.

В процессе вытеснения поршнем 9 топливной смеси из цилиндра 8 перепад давлений между цилиндром и камерой 7 не большой и им можно пренебречь. Исходя из этого, будем считать, сжатие топливной смеси происходит в едином объеме цилиндра 8 и камеры 7. Тогда изменение параметров среды в дополнительной камере сгорания 10, цилиндре 8 можно описать следующими зависимостями [9]:

$$P_{DK} = P_z \left( \frac{V_{DK}}{V_{DK} + f_{ц} X} \right)^{k_{\Gamma}} = \lambda P_c \left( \frac{\vartheta_{DK}}{\vartheta_{DK} + \vartheta_{ц} x} \right)^k \quad (2)$$

$$P_{ц} = P_c \left( \frac{V_{ц} + V_K}{V_{ц} + V_K - f_{ц} X} \right)^{k_c} = P_c \left( \frac{\vartheta_{ц} + 1}{1 + \vartheta_{ц} - \vartheta_{ц} x} \right)^{k_c} \quad (3)$$

$$x = X/H \quad (4)$$

$$\vartheta_{ц} = V_{ц}/V_K, \quad \vartheta_{DK} = V_{DK}/V_K, \quad (5)$$

где  $V_{DK}$ ,  $V_{ц}$ ,  $V_K$  – объемы дополнительной камеры сгорания, рабочего цилиндра и камеры сгорания,  $m^3$ ;

$\vartheta_{DK}$ ,  $\vartheta_{ц}$  – относительные объемы дополнительной камеры сгорания и рабочего цилиндра;

$X$  – перемещение поршня, м;

$x$  – относительный ход поршня;

$k$  – показатель адиабаты продуктов сгорания,  $k \approx 1,28$ ;

$k_c$  – показатель адиабаты топливной смеси,  $k_c \approx 1,4$ .

Давление достигает максимального значения в конце хода поршня, т.е. при  $x = 1$ . Тогда из зависимости (3) получим:

$$P_{Cmax} = P_c \left( \frac{V_{ц} + V_K}{V_K} \right)^{k_c}, \quad (6)$$

$$П = P_{Cmax}/P_c = (1 + \vartheta_{ц})^{k_c}, \quad (7)$$

где  $P_{Cmax}$  – максимальное давление топливной смеси в камере сгорания, Па;

$П$  – степень повышения давления топливной смеси.

Наряду с давлением увеличивается также и температура:

$$T_{Cmax} = T_c \left( \frac{V_{ц} + V_K}{V_K} \right)^{\frac{k_c - 1}{k_c}}, \quad (8)$$

$$П_T = T_{Cmax}/T_c = (1 + \vartheta_{ц})^{\frac{k_c - 1}{k_c}} \quad (9)$$

где  $T_c$  – начальная абсолютная температура топливной смеси, К;

$T_{Cmax}$  – максимальная абсолютная температура топливной смеси, К;

$П_T$  – степень увеличения абсолютной температуры топливной смеси.

Условием достижения максимально возможного давления топливной смеси является равенство работ сжатия смеси  $L_c$  и расширения продуктов сгорания  $L_p$ , т.е.

$$L_c = L_p. \quad (10)$$

Используя зависимости (2) и (3) и известные формулы для определения работы, совершаемой газом, можно записать:

$$L_p = \frac{\lambda P_c V_{DK}}{k-1} \left( 1 - \left( \frac{V_{DK}}{V_{DK} + V_{ц}} \right)^{k-1} \right), \quad (11)$$

$$L_c = \frac{P_c (V_{ц} + V_K)}{k_c - 1} \left( \left( \frac{V_{ц} + V_K}{V_K} \right)^{k_c - 1} - 1 \right), \quad (12)$$



Подставляя эти зависимости в уравнение (10) и учитывая зависимости (5), получим

$$\frac{k_c-1}{\lambda(k_c-1)}(1+\vartheta_{\Pi})\left((1+\vartheta_{\Pi})^{k_c-1}-1\right)=\vartheta_{\Pi}\left(1-\left(\frac{\vartheta_{\text{ДК}}}{\vartheta_{\text{ДК}}+\vartheta_{\Pi}}\right)^{k_c-1}\right). \quad (13)$$

Если значения  $\vartheta_{\text{ДК}}$  и  $\vartheta_{\Pi}$  соответствуют этому уравнению, то достигается наибольшее сжатие топливной смеси. При этом обеспечивается также плавная остановка поршня в конце его хода. Покажем это. Движение поршня описывается уравнением:

$$m \frac{dw}{dt} = f_{\Pi}(P_{\text{ДК}} - P_{\Pi}), \quad (14)$$

где  $m$  – масса поршня, кг;

$w$  – скорость поршня, м/с;

$t$  – время, с;

$f_{\Pi}$  – площадь поперечного сечения рабочего цилиндра, м<sup>2</sup>.

Проведем замену переменной в уравнении (14), учитывая при этом, что

$$W = \frac{dX}{dt} \quad (15)$$

$$m \frac{dw}{dt} = m \frac{dw}{dX} \frac{dX}{dt} = mW \frac{dw}{dX} = \frac{d}{dX} \left( \frac{mw^2}{2} \right) = \frac{dE}{dX} = \frac{dE}{HdX} = \frac{f_c P_c}{f_c P_c H} \frac{dE}{dX} = f_c P_c \frac{d}{dX} \left( \frac{E}{f_{\Pi} P_c H} \right) = f_{\Pi} P_c \frac{d\varepsilon}{dX},$$

где  $E$  – кинетическая энергия поршня, Дж;

$\varepsilon$  – безразмерная кинетическая энергия поршня.

Тогда с учетом зависимостей (2), (3) уравнение (14) примет следующий вид

$$\frac{d\varepsilon}{dX} = \lambda \left( \frac{\vartheta_{\text{ДК}}}{\vartheta_{\text{ДК}}+\vartheta_{\Pi}x} \right)^k - \left( \frac{\vartheta_{\Pi+1}}{1+\vartheta_{\Pi}-\vartheta_{\Pi}x} \right)^{k_c} \quad (16)$$

Интегрируя это уравнение, получим

$$\varepsilon = \frac{\lambda \vartheta_{\text{ДК}}^k}{\vartheta_{\Pi}(1-k)} (\vartheta_{\text{ДК}} + \vartheta_{\Pi}x)^{1-k} + \frac{(\vartheta_{\Pi+1})^{k_c}}{\vartheta_{\Pi}(1-k_c)} (1 + \vartheta_{\Pi} - \vartheta_{\Pi}x)^{1-k_c} + C \quad (17)$$

Величину  $C$  находим из условия:

$$\text{при } x = 0 \quad \varepsilon = 0.$$

Подставляя это в зависимость (17), получим

$$C = \frac{\lambda \vartheta_{\Pi}}{\vartheta_{\Pi}(k-1)} + \frac{1+\vartheta_{\Pi}}{\vartheta_{\Pi}(k_c-1)}. \quad (18)$$

Из выражений (17), (18) получим:

$$\varepsilon = \frac{\lambda \vartheta_{\text{ДК}}}{\vartheta_{\Pi}(k-1)} \left( 1 - \left( \frac{\vartheta_{\text{ДК}}}{\vartheta_{\text{ДК}}+\vartheta_{\Pi}x} \right)^{k-1} \right) + \frac{1+\vartheta_{\Pi}}{\vartheta_{\Pi}(k_c-1)} \left( 1 - \left( \frac{1+\vartheta_{\Pi}}{1+\vartheta_{\Pi}-\vartheta_{\Pi}x} \right)^{k_c-1} \right). \quad (19)$$

Полученная зависимость позволяет проследить изменение энергии поршня в процессе его движения.

*Сгорание топливных смесей в полости матрицы и камере сгорания.*

Начальное давление смеси в полости матрицы в  $n$  раз больше, чем в дополнительной

камере сгорания. Тогда, учитывая, что при изохорическом процессе изменение температуры пропорционально изменению давления, по аналогии с формулой (1) можно записать

$$P_M = n\lambda P_c, \quad (20)$$

$$T_M = \lambda T_c / \xi_z, \quad (21)$$

где  $P_M$  – давление продуктов сгорания в полости матрицы, Па;

$T_M$  – абсолютная температура продуктов сгорания в полости матрицы, К;

$\xi_z$  – коэффициент, учитывающий полноту сгорания топлива и теплоотдачу в стенку.

Температура топливной смеси в камере сгорания имеет значительную величину. Опытные данные по горению топливных смесей при повышенных температурах отсутствуют, поэтому температуру продуктов сгорания в камере сгорания определим по уравнению теплового баланса:

$$22.4 \xi_z H_{\text{и}} / M_c + C_{Vc} t_{c\text{max}} = \mu C_{Vz} t_z, \quad (22)$$

где  $H_{\text{и}}$  – низшая тепловая способность горючего газа, Дж/м<sup>3</sup>;

$M_c$  – количество топливной смеси, кмоль смеси / кмоль горючего газа;

$C_{Vc}$  – удельная мольная теплоемкость топливной смеси при постоянном объеме, Дж/(кмоль·К);

$t_{c\text{max}}$  – температура топливной смеси, °С;

$t_z$  – температура продуктов сгорания, °С.

Температура  $t_{c\text{max}}$ , входящая в уравнение (22), выражается через абсолютную температуру топливной смеси, используя при этом зависимость (8),

$$t_{c\text{max}} = T_{\text{max}} - 273 = T_c (1 + \vartheta_{\Pi})^{\frac{k_c-1}{k_c}} - 273. \quad (23)$$

Зная температуру топливной смеси, по уравнению (22) определяется температура продуктов сгорания  $t_z$ , а затем вычисляется абсолютная температура продуктов сгорания

$$T_z = t_z + 273. \quad (24)$$

По найденной величине  $T_z$  вычисляется увеличение давления в результате сгорания топлива

$$\lambda_K = \mu T_z / T_{c\text{max}}. \quad (25)$$

По найденной величине  $\lambda_K$  определяется максимальное давление в камере сгорания

$$P_{K\text{max}} = P_{c\text{max}} \cdot \lambda_K = P_c \Pi \lambda_K = P_c \Pi_{\Sigma}, \quad (26)$$

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi \lambda_K, \quad (27)$$

где  $\Pi_{\Sigma}$  – общая степень увеличения давления в камере сгорания.

*Термодинамические процессы, совершающиеся в процессе штамповки.*

В начале процесса штамповки, когда температура заготовки еще невелика, а давление в камере сгорания во много раз больше давления

в матрице, происходит с высокой скоростью вытяжка заготовки вглубь матрицы. При этом из-за уменьшения свободного объема полости матрицы газ в ней сжимается и его давление интенсивно увеличивается, а в камере сгорания оно наоборот снижается. Из-за этого через короткий промежуток времени давление в полости матрицы становится соизмеримым с давлением в камере сгорания. При этом вытяжка заготовки прекращается, после чего происходит интенсивный нагрев заготовки.

Определим объем части полости матрицы, занимаемой заготовкой, соответствующий этому моменту. Считая в первом приближении расширение и сжатия газа адиабатическими процессами, можно записать

$$P_{Kmax} V_K^k = P^* (V_K + V^*)^k, \quad (28)$$

$$P_M V_M^k = P^* (V_M - V^*)^k, \quad (29)$$

где  $V^*$  – объем полости матрицы, занимаемый заготовкой,  $m^3$ ;

$P^*$  – давление в конечной стадии вытяжки, Па.

Из уравнений (28) и (29), учитывая зависимости (20) и (26), получим:

$$\frac{V^*}{V_M} = \frac{a-1}{a+\vartheta_M} \quad (30)$$

$$a = \left( \frac{P_{Kmax}}{P_M} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (31)$$

$$\vartheta_M = V_M / V_K. \quad (32)$$

В период вытяжки заготовка имеет сравнительно невысокую температуру. Существенное повышение температуры заготовки происходит после выравнивания давлений. Для обеспечения интенсивного нагрева заготовки в этот период она не должна соприкасаться с донной частью матрицы. Для этого достаточно соблюдение следующего условия:

$$V^* \leq \frac{2}{3} V_M. \quad (33)$$

Тогда, учитывая уравнение (30), можно записать

$$\frac{a-1}{a+\vartheta_M} \leq \frac{2}{3}. \quad (34)$$

Уменьшение объема камеры сгорания ведет к уменьшению габаритных размеров штамповочного устройства. Однако при чрезмерном уменьшении ее объема незначительная деформация заготовки в период сжатия топливной смеси может ощутимо изменить объем камеры сгорания. В этой связи целесообразно принять объем камеры сгорания равным объему матрицы, предназначенной для штамповки детали наибольшего объема из ассортимента штампуемых деталей, т.е.

$$V_K = V_M \quad (35)$$

Тогда их выражений (32) и (34), (35) получим

$$\frac{a-1}{a+1} \leq \frac{2}{3} \quad (36)$$

Отсюда, принимая во внимание зависимость (34), можно записать:

$$\lambda_{\Sigma} \leq n \lambda 5^k. \quad (37)$$

Выражение (37) определяет максимально возможную величину общей степени увеличения давления в камере сгорания.

Из уравнений (28), (29), (33), (34) получим:

$$P^* = P_{Kmax} \left( \frac{3}{5} \right)^k \quad (38)$$

$$P^* = P_M 3^k. \quad (39)$$

Используя зависимости (38) и (39), можно определить температуру газа в камере сгорания и матрице в конечной стадии процесса вытяжки:

$$T_K^* = T_z \left( \frac{P^*}{P_{Kmax}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (40)$$

$$T_M^* = T_M \left( \frac{P^*}{P_M} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (41)$$

где  $T_M$  и  $T_z$  определяются зависимостями (21), (24).

### Результаты анализа термодинамических процессов штамповочного устройства

Уравнение (11) решено численным методом, используя программу Mathcad. Полученное решение представлено на рис. 2 в виде графика зависимости  $\vartheta_{DK}$  от  $\vartheta_{Ц}$ . Объемы дополнительной камеры сгорания и рабочего цилиндра должны соответствовать этому графику. В этом случае максимально используется потенциальная энергия топлива дополнительной камеры сгорания.

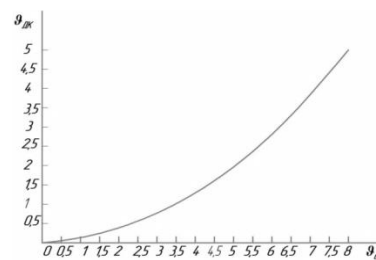


Рис. 2. График зависимости  $\vartheta_{DK}$  от  $\vartheta_{Ц}$

На рис. 3 показан график, построенный по зависимости (19), который характеризует изменение безразмерной кинетической энергии поршня в процессе его движения. График построен для случая, когда  $\vartheta_{Ц} = 2,5$ ,  $\vartheta_{DK} = 0,56$ , которые взяты из графика на рис. 2. При других значениях  $\vartheta_{Ц}$  и  $\vartheta_{DK}$  форма графика аналогична. Как видно из данного графика при  $x = 1$  и  $\varepsilon = 0$ , т.е. кинетическая энергия поршня равна

нулю. Следовательно, выбор значений  $\vartheta_{ц}$  и  $\vartheta_{дк}$  по графику на рис. 2 позволяет обеспечить плавную остановку поршня. Однако из-за некоторой деформации штампуемой заготовки в период сжатия топливной смеси поршень в конце своего хода может обладать небольшой скоростью. Поэтому для безударной остановки поршня предусмотрена эластичная шайба 18 (рис. 1).

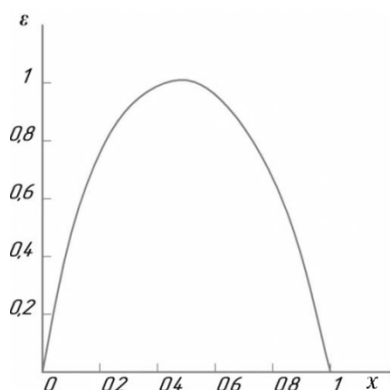


Рис. 3. График зависимости безразмерной кинетической энергии поршня от его относительного хода  $x$

На рис. 4 представлены графики зависимости  $\Pi$  и  $\Pi_T$  топливной смеси от относительного объема рабочего цилиндра  $\vartheta_{ц}$ . С ростом величины  $\vartheta_{ц}$  давление топливной смеси непрерывно увеличивается, но при этом повышается и ее температура. Увеличение давления топливной смеси повышает давление продуктов сгорания, а увеличение ее температуры, согласно зависимости (25), наоборот снижает его. Из графика видно, что при  $\vartheta_{ц} \geq 5$  интенсивность роста степени повышения температуры  $\Pi_T$  снижается, а интенсивность роста степени увеличения давления  $\Pi$  повышается. Исходя из этого, можно заключить: относительный объем рабочего цилиндра целесообразно принять равным 5 и более, т.е.  $\vartheta_{ц} \geq 5$ .

Уравнение теплового баланса процесса сгорания сжатой топливной смеси (22) решено численным методом. При этом температура топливной смеси  $t_{сmax}$ , входящая в это уравнение, вычислялась по зависимости (23). Так как величина  $t_{сmax}$  зависит от относительного объема рабочего цилиндра  $\vartheta_{ц}$ , то и температура продуктов сгорания зависит от  $\vartheta_{ц}$ . В интервале значений  $\vartheta_{ц}$  от 5 до 8 температура продуктов сгорания  $T_z$  находится в пределах 2463...2505 К (2190...2232 °С). Используя эти значения  $T_z$  по зависимости (25) определена степень увеличения давления в результате сгорания топлива  $\lambda_k$ .

В интервале значений  $\vartheta_{к}$  от 5 до 8 величина  $\lambda_k$  плавно снижается от 5,32 до 4,84.

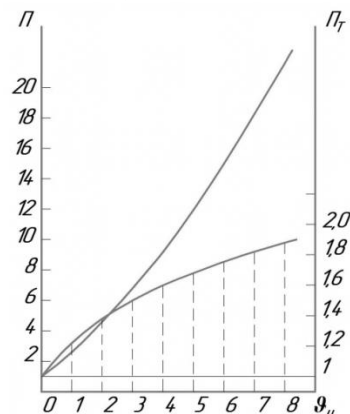


Рис. 4. Графики зависимости  $\Pi$  (график 1) и  $\Pi_T$  от относительного объема рабочего цилиндра  $\vartheta_{ц}$

На рис. 5 представлен график зависимости общей степени увеличения давления  $\Pi_{\Sigma}$ , вычисленной по зависимости (27), от относительного объема рабочего цилиндра  $\vartheta_{ц}$ . Форма графика близка к прямой линии. Это связано с тем, что по мере роста  $\vartheta_{ц}$  интенсивность роста  $\Pi$  повышается, а величина  $\lambda_k$  снижается.

Увеличение относительного объема рабочего цилиндра  $\vartheta_{ц}$ , увеличивая величину  $\lambda_{\Sigma}$ , повышает давление газа на штампуемую заготовку. Однако чрезмерное увеличение  $\vartheta_{ц}$  нецелесообразно, так как это вызывает рост габаритных размеров штамповочного устройства. Кроме того, имеется также ограничение, связанное с обеспечением нагрева заготовки и выраженное условием (37).

Начальное давление топливной смеси  $P_c$  ограничено мощностью воздушного компрессора и системой топливоподачи штамповочного устройства. Однофазный компрессор создает давление не более 1...1,1 МПа. Управляющие клапаны системы топливоподачи также рассчитаны примерно на такое же давление. Поэтому коэффициент  $n$ , входящий в зависимость (20), не может быть больше 1,7 при  $P_c = 0,6$  МПа. Примем  $n = 1,7$ . Тогда, учитывая, что  $\lambda = 7,6$ ,  $k = 1,28$ , по зависимости (37) получим  $\lambda_{\Sigma} = 101,4$ .

Из графика на рис. 5 видно, что при  $\vartheta_{ц} = 8$   $\lambda_{\Sigma} = 105$ . Учитывая это, можно считать  $\vartheta_{ц} = 8$  крайне верхним значением относительного объема рабочего цилиндра. Следовательно оптимальная область значений  $\vartheta_{ц}$  находится в пределах от 5 до 8. Этой области значений  $\vartheta_{ц}$  согласно графику на рис. 2 соответствуют значения  $\vartheta_{дк}$  в пределах от 2 до 4,8, которые можно считать оптимальными значениями  $\vartheta_{дк}$ . Следовательно, объем рабочего цилиндра должен превышать в

5...8 раз объем камеры сгорания, а объем дополнительной камеры сгорания – в 2...4,8 раз.

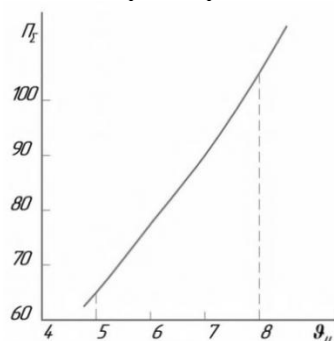


Рис. 5. График зависимости общей степени повышения давления  $P_i$  от относительного объема рабочего цилиндра  $V_u$

Согласно зависимости (26) и графику на рис. 5 при  $V_u = 8$  и  $P_c = 0,6$  МПа давление продуктов сгорания составляет не менее 60 МПа, а температура достигает 2230 °С, что достаточно для нагрева и деформирования заготовок из трудно деформируемых сплавов. Кроме того, сжатие газа в полости матрицы способствует предотвращению разрыва заготовки при ее вытяжке, а также интенсифицирует нагрев заготовки. В заключительной стадии процесса вытяжки заготовки согласно зависимостям (40) и (41) температура в полости матрицы составляет 2680 °С, а в камере сгорания 1890 °С. Благодаря этому осуществляется быстрый нагрев заготовки, что обеспечивает существенное повышение ее пластичности в заключительной стадии процесса штамповки. Перечисленные факторы создают благоприятные условия для осуществления процесса штамповки. Это позволяет штамповать на данном устройстве детали различной формы из сплавов, не обладающих высокой пластичностью.

### Заключение

1. Разработано устройство газовой штамповки, создающее высокое давление на поверхности заготовки, достаточное для штамповки большого ассортимента деталей из высокопрочных сплавов.

2. Проведена оптимизация конструктивных параметров разработанного устройства: оптимальные соотношения объемов рабочего цилиндра и камеры сгорания составляет 5...8, а объемов дополнительной камеры сгорания и

камеры сгорания – 2...4,8; установлена также зависимость, связывающая между собой оптимальные соотношения указанных параметров.

3. Сжатие газа в полости матрицы в процессе штамповки способствует предотвращению разрыва заготовки из мало пластичных сплавов.

### Литература

1. Ильин Л.Н., Семенов Е.И. Технология листовой штамповки. – М.: Дрофа, 2009. 479 с.
2. Ковалевич М.В., Гончаров А.В. Способы изотермической штамповки листовых деталей из алюминиевых и титановых сплавов // СТИН. 2020. № 9. С. 29-32.
3. Азингареев В.В. Изотермическая штамповка титановых полусфер для криогенных шар-баллонов // Решетневские чтения. 2011. Т. 1. С. 310-311.
4. О концепции использования технологических критериев для выбора импульсных технологий листовой штамповки / С.А. Бычков, В.К. Борисевич, В.С. Кривцов, А.П. Брагин // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 11. С. 222-231.
5. Тараненко М.Е. Возможности штамповки автокузовных панелей из современных материалов повышенной прочности на ЭГ-прессах // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 9. С. 34-40.
6. Пат. 2021058 Российская Федерация, RU 2021058 МПК B21D 26/02. Способ листовой штамповки с подогревом / Карпов Л.П., Субботина О.В. Оpubл. 10.06.2003. Бюл. № 16.
7. Пат. 2169628 Российская Федерация, RU 2169628 МПК B21D 26/02. Способ формования листа из высокопластичного алюминиевого или титанового сплава / Е. Пол Краджевски. Оpubл. 21.06.2001.
8. Пат. 2021053 Российская Федерация, RU 2021053 МПК B21D 22/02. Штамп для формовки деталей с электродным нагревом заготовок / А.М. Петров, Б.Н. Марьин, Е.Н. Мельников и др. Оpubл. 15.10.1994.
9. Алексеев П.А., Панченко Е.В. Моделирование процесса формообразования осесимметричной оболочки в режиме свехпластичности // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Вып. 3. С. 181-185.
10. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных материалов / С. С. Яковлев и др.; М.: Машиностроение, 2009. 352 с.
11. Бисилов Н.У., Малсугенов Р.С. Теоретические и экспериментальные исследования процесса газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки // Инженерная мысль машиностроения будущего: сб. материалов Всерос. молодежной науч.-практ. конф. с междунар. участием. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 179 - 184.
12. Байрамуков Р.А. Разработка и исследование технологии и устройства для газовой штамповки с поршневым мультипликатором давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Байрамуков Рашид Альбертович. Черкесск, 2018. 158 с.



Поступила 11.03.2022; принята к публикации 18.04.2022

### Информация об авторах

**Боташев Анвар Юсуфович** – д-р техн. наук, профессор, Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: botashev11@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9635-3040>

**Байрамуков Рашид Альбертович** – доцент кафедры «Технологические машины и переработка материалов», Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: melov.mel@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7460-6900>

**Айбазов Аслан Аликович** – аспирант, Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: 09aslan96@mail.ru

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A DEVICE FOR STAMPING PARTS FROM HARD-TO-DEFORM ALLOYS

**A.Yu. Botashev, R.A. Bayramukov, A.A. Aybazov**

**North-Caucasian State Academy, Cherkessk, Russia**

**Abstract:** we developed a device for use in small-scale production for stamping sheet parts from high-strength alloys. Stamping is carried out by the pressure of the products of combustion of gaseous fuel. The device contains a working cylinder with a piston and two combustion chambers: main and additional. The design feature of this device is the presence of a plate containing through holes and a check valve between the working cylinder and the combustion chamber. Due to this, the energy carrier is compressed and burned in the combustion chamber, as a result of which gas is generated with a pressure of up to 60 MPa and a temperature of 2100 ... 2200 °C, which deforms the workpiece. During the stamping process, combustion products are also compressed in the die cavity, which helps to prevent the workpiece from breaking. In addition, due to their compression, the temperature in the cavity of the matrix increases intensively and reaches 2600 ... 2680 °C. Due to this, a rapid heating of the workpiece is carried out, which, providing a significant increase in its plasticity, facilitates the stamping of parts of complex shape. By analyzing the working process of the stamping device, optimization of its design parameters was carried out, which ensures, at a given pressure of the energy carrier, the achievement of the maximum gas pressure acting on the blank being stamped. In particular, the optimal ratios of the volumes of the working cylinder and the combustion chamber, as well as the ratio of the volumes of the combustion chambers, were found. This device allows you to stamp a wide range of parts from high-strength low-ductility alloys

**Key words:** gas stamping devices, stamping of low-plastic alloys

### References

1. Il'in L.N., Semenov E.I. "Sheet metal stamping technology" ("Tekhnologiya listovoy shtampovki"), Moscow: Drofa, 2009, 479 p.
2. Kovalevich M.V., Goncharov A.V. "Methods for isothermal stamping of sheet parts from aluminum and titanium alloys", *STIN*, 2020, no. 9, pp. 29-32.
3. Azingareev V.V. "Isothermal forging of titanium hemispheres for cryogenic balloons", *Reshetnev readings (Reshetnevskie chteniya)*, 2011, vol. 1, pp. 310-311.
4. Bychkov S.A., Borisevich V.K., Krivtsov V.S., Bragin A.P. "On the concept of using technological criteria for the selection of pulse technologies for sheet stamping", *Aviation and Space Equipment and Technology (Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya)*, 2007, no. 11, pp. 222-231.
5. Taranenko M.E. "Possibilities of stamping auto body panels from modern high-strength materials on EG-presses", *Forging and Stamping Production. Processing of Materials by Pressure (Kuznechno-shtampovnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem)*, 2014, no. 9, pp. 34-40.
6. Karpov L.P., Subbotina O.V. "The method of sheet stamping with heating" ("Sposob listovoy shtampovki s podogrevom"), patent 2021058 Russian Federation, RU 2021058 IPC B21D 26/02, published 06.10.2003, bull. 16.
7. Krajowski E.P. "A method for forming a sheet from a highly ductile aluminum or titanium alloy" ("Sposob formovaniya lista iz vysokoplastichnogo alyuminievogo ili titanovogo splava"), patent 2169628 Russian Federation, RU 2169628 IPC B21D 26/02, published 21.06.2001.
8. Petrov A.M., Mar'in B.N., Mel'nikov E.N. et al. "Stamp for forming parts with electrocontact heating of workpieces" ("Shtamp dlya formovki detaley s elektrokontaktym nagrevom zagotovok"), patent 2021053 Russian Federation, RU 2021053 IPC B21D 22/02, publ. 15.10. 1994.
9. Alekseev P.A., Panchenko E.V. "Modeling the process of shaping an axisymmetric shell in the superplasticity mode", *News of Tula State University. Technical science (Izvestiya TulGU)*, issue 3, 2010, pp. 181-185.
10. Yakovlev S.S. et al. "Isothermal pneumoforming of anisotropic high-strength materials" ("Izotermicheskaya pnevmoformovka anizotropnykh vysokoprochnykh materialov"), Moscow: Mashinostroenie, 2009, 352 p.
11. Bisilov N.U., Malsugenov R.S. "Theoretical and experimental studies of the process of gas stamping with double-sided heating of the workpiece", *Engineering Thought of Mechanical Engineering of the Future: collection of materials of Russian youth scientific-practitioner. conf. with international participation (Inzhenernaya mysl' mashinostroeniya budushchego)*, Yekaterinburg, 2013, pp. 179-184.
12. Bayramukov R.A. "Development and research of technology and devices for gas stamping with a piston pressure multiplier" ("Razrabotka i issledovanie tekhnologii i ustroystva dlya gazovoy shtampovki s porshnevym multiplikatorom davleniya"), diss. of Cand. Tech. Sciences, 05.02.09, Cherkessk, 2018, 158 p.

Submitted 11.03.2022; revised 18.04.2022

### Information about the authors

**Anvar Yu. Botashev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropolskaya str., Cherkessk 369001, Russia), e-mail: botashev11@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9635-3040

**Rashid A. Bayramukov**, Associate Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropolskaya str., Cherkessk 369001, Russia), e-mail: melov.mel@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7460-6900

**Aslan A. Aibazov**, graduate student, North Caucasian State Academy (36 Stavropolskaya str., Cherkessk 369001, Russia), e-mail: 09aslan96@mail.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕПОДВИЖНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ

А.И. Болдырев, А.В. Перова, А.А. Болдырев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** статья посвящена изучению вопросов решения задач определения наиболее значимых параметров процесса анодного растворения токопроводящего материала в среде электролита, реализуемого по схеме с неподвижными электродами. При такой схеме обработки детали отклонения от требуемых геометрических параметров характеризуют как точность, так и качество обрабатываемых поверхностей. Применение метода планирования экспериментов позволило установить влияние ряда факторов электрохимической обработки образцов из стали 40Х13 на удельный съем материала, неплоскостность и непараллельность обрабатываемых поверхностей относительно рабочего торца электрода-инструмента. Анодное растворение торцовых поверхностей цилиндрических образцов диаметром 11 мм и высотой 6 мм осуществлялось при продольном течении электролита в экспериментальной электрохимической ячейке, установленной на серийном станке модели СЭХО-901 с адаптивными режимами обработки. Факторами, подлежащими исследованию, являлись межэлектродный зазор, напряжение на электродах, концентрация электролита, температура и скорость течения электролита, водородный показатель. При этом серия экспериментов планировалась таким образом, чтобы каждый из факторов варьировался на двух уровнях, симметричных относительно базового. Применение регрессионного анализа при планировании экспериментов позволило в результате проведения исключить незначимые факторы и установить основные факторы, влияющие на образование макронеровностей: межэлектродный зазор; концентрация и скорость электролита в зазоре

**Ключевые слова:** электрохимическая обработка, неподвижные электроды, планирование экспериментов, регрессионный анализ

### Введение

Электрохимическая обработка (ЭХО) – процесс анодного растворения токопроводящего материала в среде электролита. Одной из технологических схем реализации процесса ЭХО является обработка с неподвижными электродами. По этой схеме выполняется как безразмерная обработка (электрохимическое полирование), так и размерное формообразование (получение мелких углублений, изготовление отверстий, удаление заусенцев, нанесение информации и др.) [1].

При реализации ЭХО неподвижным электродом-инструментом (ЭИ) одной из важнейших задач является получение стабильных геометрических параметров детали. Отклонения от заданной геометрической формы являются характеристикой не только точности, но и качества обрабатываемых поверхностей, когда процесс ЭХО сопровождается образованием струйности, растравливания, выступов, впадин и других дефектов [2].

В данной работе с применением аппарата математического метода планирования экспериментов исследовалось влияние ряда факто-

ров [3] на удельный съем материала, неплоскостность и непараллельность обрабатываемых поверхностей образцов, выполненных из стали 40Х13 (ГОСТ 4543-71), относительно рабочего торца ЭИ. Целью работы являлось определение значимости факторов процесса ЭХО неподвижными ЭИ и выявление основных факторов, влияющих на отклонения от заданной геометрической формы.

Эксперименты проводились на цилиндрических образцах диаметром 11 мм и высотой 6 мм в экспериментальной электрохимической ячейке, установленной на серийном станке модели СЭХО-901 с адаптивными режимами обработки (рисунок).



Общий вид экспериментальной установки

Обрабатывались торцевые поверхности образцов при продольном течении электролита на режимных параметрах, рекомендованных [4].

Системы управления станка позволяли в процессе проведения экспериментов измерять напряжение, силу тока, температуру в межэлектродном промежутке, температуру и скорость электролита и др. При проведении экспериментов загрязненность электролита не превышала 10-15 % суточного отстоя.

### Условия проведения экспериментов

Факторы, подлежащие исследованию, и уровни их варьирования показаны в табл. 1.

Таблица 1

Факторы	Уровни варьирования факторов				
	Основной уровень	Интервал варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень	Индекс фактора
Межэлектродный зазор, мм	1	0,5	1,5	0,5	X <sub>1</sub>
Концентрация NaCl, г/л	170	70	240	100	X <sub>2</sub>
Концентрация Na <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub> , г/л	25	20	45	5	X <sub>3</sub>
Водородный показатель	7	3	10	4	X <sub>4</sub>
Температура электролита, °C	35	15	50	20	X <sub>5</sub>
Скорость электролита, м/с	7	3	10	4	X <sub>6</sub>
Напряжение на электродах, В	13	5	18	8	X <sub>7</sub>

Серия экспериментов планировалась таким образом, чтобы каждый из факторов варьировался на двух уровнях, симметричных относительно базового. Проведение серии экспериментов заканчивалась заполнением правой части факторного плана, представленного в табл. 2, где Y<sub>1</sub> – удельный съем металла в мг/с·см<sup>2</sup>, а Y<sub>2</sub> – среднеквадратическая высота неровностей в мкм. Знаки «+» и «-» обозначают верхний и нижний уровень варьирования параметра, соответственно.

Таблица 2

№ экспери- мента	Индекс									
	X	X	X	X	X	X	X	Y	Y	
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	
1	+	-	-	-	-	+	+			
2	-	-	-	+	+	+	-			
3	+	+	-	+	-	-	-			
4	-	+	-	-	+	-	+			
5	+	-	+	-	+	-	-			
6	-	-	+	+	-	-	+			
7	+	+	+	+	+	+	+			
8	-	+	+	-	-	+	-			

Образцы до и после обработки взвешивались на лабораторных весах ВЛЭ-2202С с точностью 0,01 г. Время обработки назначалось в зависимости от снимаемого припуска, который определялся перед каждым экспериментом обработкой контрольного образца. Величина припуска соответствовала припуску, снимаемого в производственных условиях, и составляла 0,15-0,20 мм. Во всех точках ставилось одинаковое число параллельных экспериментов, равное трем.

После ЭХО производился обмер обрабатываемой поверхности посредством индикатора вдоль потока электролита от точки его входа до точки выхода с интервалом 1 мм. По значениям замеров для каждого из образцов подсчитывалось значение среднеквадратичной высоты неровностей:

$$\sigma_{\text{нер}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2}{n}},$$

$$\text{где } x_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$$

$x_i$  – величина  $i$ -го замера;

$n$  – количество замеров.

### Определение параметров ЭХО неподвижным ЭИ

По результатам взвешиваний и замеров образцов вычисления производились в следующем порядке [5]:

1. Определение величины коэффициентов регрессии

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n \text{sign } 4}{n},$$

где  $b_i$  – коэффициент регрессии;

sign 4 – произведение  $X_i$  (табл. 2) на среднее значение соответствующего фактора;

$n$  – число экспериментов в серии (в нашем случае  $n = 8$ ).

2. Расчет дисперсий для каждой точки эксперимента:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ji} - y_{срi})^2}{m-1},$$

где  $S_i^2$  – дисперсия в  $i$ -й точке;

$m$  – число параллельных экспериментов;

$y_{ji}$  – отклик  $j$ -го параллельного отклика;

$y_{срi}$  – средний отклик в данном эксперименте.

3. Вычисление критерия Кохрена [6]

$$G = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2},$$

и сравнение его с табличным значением  $G_{\text{табл}}$  [7]. Дисперсии однородны в случае  $G \leq G_{\text{табл}}$ .

4. Расчет дисперсии воспроизводимости параметров оптимизации (средняя арифметическая дисперсий в точках):

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (y_{ji} - y_i)^2}{n(m-1)}.$$

5. Определение дисперсии коэффициентов регрессии

$$S_b^2 = \frac{S_y^2}{n}.$$

6. Определение значимости коэффициента регрессии. Значимость коэффициентов определялась по критерию Стьюдента  $t = 2$  при выбранном уровне значимости 5 %. Коэффициент значим, если выполняется неравенство

$$|b_i| > t \sqrt{S_b^2} = t \cdot S_b. \quad (1)$$

7. Нахождение математической модели. Уравнение регрессии, полученное в результате экспериментов, имеет вид

$$y = b + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7, \quad (2)$$

где  $b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ ;

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  – коэффициенты регрессии;

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$  – кодированные текущие значения факторов, взятые относительно нулевого (основного) уровня.

Математическая модель представляется уравнением

$$Y_p = b' + b_1' x_1 + b_2' x_2 + b_3' x_3 + b_4' x_4 + b_5' x_5 + b_6' x_6 + b_7' x_7, \quad (3)$$

которое получается в результате подстановки значений  $x_n$  ( $n=1-7$ ) в уравнение (2):

$$x_n = \frac{x_i - x_{i0}}{S_i},$$

где  $Y_p$  – значение параметра оптимизации, предсказываемое уравнением (3), рассматривалось для удельного съема металла и среднеквадратичной высоте неровностей;

$x_i$  – натуральное текущее значение фактора;

$x_{i0}$  – натуральное значение основного уровня;

$S_i$  – натуральное значение интервала варьирования.

Расчетные значения  $Y_p$  получают для каждого опыта в серии экспериментов.

8. Определение дисперсии адекватности

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{pi})^2}{n-k},$$

где  $y_i$  – значение параметра оптимизации, полученное в  $i$ -м эксперименте;

$y_{pi}$  – значение параметра оптимизации, предсказываемое уравнением (3) для условий  $i$ -го эксперимента;

$k$  – число коэффициентов регрессии в полученном уравнении.

9. Проверка модели на адекватность. Адекватность уравнения определяется по критерию Фишера  $F$  и оно считается адекватным, если

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}.$$

Для числа степеней свободы  $f_1 = n - k = 8 - 7 = 1$ ,  $f_2 = n(j - 1) = 8(3 - 1) = 16$  табличное значение критерия Фишера  $F_{\text{табл}} = 4,5$ .

Результаты расчетов, выполненных по вышеизложенной методике, представлены в табл. 3 и 4.

Анализируя данные таблиц и принимая во внимание условие значимости коэффициентов регрессии (1), можно заключить, что значимыми факторами в данной серии экспериментов являются:

1. По величине удельного съема металла [8]:

- межэлектродный зазор ( $b_1 = -0,559$ ) при нижнем уровне варьирования 0,5; верхнем 1,5 (табл. 1);



- концентрация электролита  $NaCl$  ( $b_2 = 0,584$ );
  - водородный показатель ( $b_4 = 0,624$ );
  - скорость электролита ( $b_6 = 0,976$ );
  - напряжение на электродах ( $b_7 = 1,056$ );
2. По средней квадратичной высоте неровностей:
- межэлектродный зазор ( $b_1 = -0,856$ );
  - концентрация электролита  $NaCl$  ( $b_2 = 1,24$ ).

Таблица 3  
К анализу адекватности модели  
по удельному съему металла

$b$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$S_1^2$	$S_2^2$
4,73	-0,559	0,584	0,309	0,624	0,389	0,976	1,056	0,5151	0,4661
$S_3^2$	$S_4^2$	$S_5^2$	$S_6^2$	$S_7^2$	$S_8^2$	$y_{cp1}$	$y_{cp2}$	$y_{cp3}$	$y_{cp4}$
0,0146	2,3029	0,0517	0,2145	0,0216	0,4581	3,75	4,77	2,54	6,24
$y_{cp5}$	$y_{cp6}$	$y_{cp7}$	$y_{cp8}$	$G_{табл}$	$S_9^2$	$S_b^2$	$t \cdot S_b$	$x_{10}$	$x_{20}$
1,56	5,59	8,05	4,75	0,5694	0,2598	0,0325	0,36	1	170
$x_{30}$	$x_{40}$	$x_{50}$	$x_{60}$	$x_{70}$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
25	7	35	7	13	1,5	100	5	4	20
$x_6$	$x_7$	$y_{p1}$	$y_{p2}$	$y_{p3}$	$y_{p4}$	$y_{p5}$	$y_{p6}$	$y_{p7}$	$y_{p8}$
10	18	4,2987	5,3317	2,6407	5,4017	1,6277	5,3307	8,1057	5,0887
$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$	$S_{ад}^2$	$F$
4,3	5,33	2,65	5,41	1,63	5,33	8,11	5,09	0,000186	0,00072

Учитывая, что коэффициент регрессии для водородного показателя по средней квадратичной высоте неровностей ( $b_4 = -0,371$ ) близок к уровню значимости ( $t \cdot S_b = 0,406$ ) и имеет отрицательное значение, приходим к выводу о необходимости уменьшения  $pH$  электролита для снижения высоты неровностей. В то же время для увеличения удельного съема металла требуется увеличение  $pH$ , т.к. коэф-

фициент регрессии имеет положительное значение.

Из-за невыполнимости одновременно двух противоположных требований, а также принимая во внимание сложность задачи регулирования  $pH$  и факт защелачивания электролита в процессе ЭХО, полагаем целесообразным установление в начале обработки  $pH = 7$ .

Коэффициент регрессии для напряжения на электродах является положительным и значимым только по величине удельного съема, поэтому напряжение должно иметь максимально возможную величину.

Таблица 4  
К анализу адекватности модели  
по среднеквадратичной высоте  
неровностей

$b$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$S_1^2$	$S_2^2$
2,806	-0,856	1,24	0,116	-0,371	0,0687	0,266	-0,091	0,0013	0,3516
$S_3^2$	$S_4^2$	$S_5^2$	$S_6^2$	$S_7^2$	$S_8^2$	$y_{cp1}$	$y_{cp2}$	$y_{cp3}$	$y_{cp4}$
2,3072	0,6757	0,1984	0,0544	0,7442	0,0224	1,04	1,99	2,66	5,01
$y_{cp5}$	$y_{cp6}$	$y_{cp7}$	$y_{cp8}$	$G_{табл}$	$S_9^2$	$S_b^2$	$t \cdot S_b$	$x_{10}$	$x_{20}$
1,405	1,575	2,57	4,62	9,5297	0,329	0,0411	0,406	1	170
$x_{30}$	$x_{40}$	$x_{50}$	$x_{60}$	$x_{70}$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
25	7	35	7	13	1,5	100	5	4	20
$x_6$	$x_7$	$y_{p1}$	$y_{p2}$	$y_{p3}$	$y_{p4}$	$y_{p5}$	$y_{p6}$	$y_{p7}$	$y_{p8}$
10	18	1,0694	2,3586	2,4556	4,8657	1,0888	1,7396	3,1745	5,6734
$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$	$S_{ад}^2$	$F$
1,07	2,36	2,46	4,87	1,109	1,74	3,18	5,68	0,00012	0,00036

## Заключение

Применение регрессионного анализа при планировании экспериментов позволило в результате проведения всего восьми опытов стабилизировать часть факторов, исключить незначимые факторы и установить три основных фактора, влияющих на величину макронеров-

ностей при ЭХО неподвижным электродом-инструментом образцов из стали 40X13: межэлектродный зазор; концентрация электролита; скорость электролита в зазоре.

Следует иметь в виду, что большое количество технологических ограничений, которые, как правило, являются функциями режимов ЭХО, оказывают свое влияние на формирование достижимых показателей обработки, т.к. по мере анодного растворения межэлектродный зазор возрастает и процесс затухает. В связи с этим комплексная многофакторная оптимизация, как отмечено в работе [9], должна базироваться на оптимальных значениях всех технологических параметров, характеризующих процесс обработки, с учетом взаимосвязей с режимами ЭХО неподвижными ЭИ. Учёт всех вышеперечисленные факторов позволит повысить качество обработки высокоточных деталей машиностроения.

#### Литература

1. Экспериментальные исследования технологических возможностей электрохимического формообразования / А.И. Болдырев, С.В. Усов, А.А. Болдырев, А.В. Мандрыкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 3.1. С. 120-121.
2. Смоленцев В.П., Болдырев А.И., Старов В.Н. Технологические методы обеспечения качества изделий авиационно-космической техники // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 2. С. 144-148.
3. Болдырев А.И., Болдырев А.А., Григораш В.В. Влияние режимных параметров процесса анодного растворения на обеспечение качества электрохимического формообразования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 4. С. 98-104.
4. Болдырев А.И., Болдырев А.А. Анализ влияния технологических факторов и режимов ЭХРО на микрогеометрию и точность обработанной поверхности // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ. 2011. С. 4-7.
5. Радченко С.Г. Методология регрессивного анализа. Киев: Корнийчук, 2011. 376 с.
6. Агаянц И.М. Азы статистики в мире химии. Обработка экспериментальных данных. СПб.: Научные основы и технологии, 2015. 618 с.
7. ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017. Статистические методы. Статистическое представление данных. Ч. 4. Выявление и обработка выбросов. М.: Стандартинформ, 2017. 49 с.
8. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. Научное издание. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
9. Оптимизация технологических процессов электрохимической обработки деталей машин / А.А. Болдырев, А.И. Болдырев, А.В. Мандрыкин, А.В. Перова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 2. С. 107-113.

Поступила 10.03.2022; принята 19.04.2022

#### Информация об авторах

**Болдырев Александр Иванович** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexboldyrev@yandex.ru, тел. (906) 584-54-21, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7855-4260>

**Перова Алла Владимировна** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pva7@mail.ru, тел. (473) 253-09-73, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2199-3817>

**Болдырев Александр Александрович** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexboldyrev@yandex.ru, тел. (904) 212-61-83, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8607-5297>

### APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS IN SOLVING THE PROBLEM OF DETERMINING SIGNIFICANT PARAMETERS FOR ELECTROCHEMICAL PROCESSING WITH A FIXED ELECTRODE-TOOL

A.I. Boldyrev, A.V. Perova, A.A. Boldyrev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article is devoted to solving problems of determining the most significant parameters for the anodic dissolution of a conductive material in the electrolyte medium, implemented according to the scheme with fixed electrodes. With such scheme for part processing, deviations from the required geometric parameters characterize both the accuracy and the quality of the surfaces being machined. The use of experiments planning method made it possible to establish the influence of several factors on electrochemical processing of samples made of steel 40X13 on the specific material removal, non-flatness and non-parallelism of the treated surfaces relative to the working end of the electrode-tool. The anodic dissolution of the cylindrical samples end surfaces with the diameter of 11 mm and height of 6 mm was carried out with a longitudinal electrolyte flow in the SEHO-901 serial machine-tool with adaptive processing modes. The factors to be studied were the following: the

interelectrode gap, the voltage on the electrodes, the concentration of the electrolyte, the temperature and speed of the electrolyte flow, and the hydrogen index. At the same time, a series of experiments was planned in such a way that each of the factors varied at two levels, symmetrical with respect to the base one. The use of regression analysis in the planning of experiments made it possible, as a result of carrying out, to exclude insignificant factors and to establish the main factors influencing the formation of macroroughness: interelectrode gap; concentration and velocity of the electrolyte in the gap

**Key words:** electrochemical processing, fixed electrodes, experiment design, regression analysis

#### References

1. Boldyrev A.I., Usov S.V., Boldyrev A.A., Mandrykin A.V. "Experimental studies of the technological possibilities of electrochemical shaping", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no 3.1, pp. 120-121.
2. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Starov V.N. "Technological methods for ensuring the quality of products of aerospace equipment", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 144-148.
3. Boldyrev A.I., Boldyrev A.A., Grigorash V.V. "Influence of regime parameters of the process of anodic dissolution on ensuring the quality of electrochemical shaping", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 98-104.
4. Boldyrev A.I., Boldyrev A.A. "Analysis of the influence of technological factors and modes of ECM on micro-geometry and accuracy of the machined surface", *Modern Production Technologies in Mechanical Engineering: coll. of scientific papers (Sovremennye tekhnologii proizvodstva v mashinostroenii: sb. nauch. tr.)*, VSTU, 2011, pp. 4-7.
5. Radchenko S.G. "Methodology of regression analysis" ("Metodologiya regressivnogo analiza"), Kiev: Kornijchuk, 2011, 376 p.
6. Agayancz I.M. "Basics of statistics in the world of chemistry. Processing of experimental data" ("Azy statistiki v mire khimii. Obrabotka eksperimental'nykh dannykh"), St.-Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2015, 618 p.
7. GOST R ISO 16269-4-2017. "Statistical methods. Statistical presentation of data. Part 4. Identification and processing of outliers", Moscow: Standartinform, 2017, 49 p.
8. Smolentsev E.V. "Design of electrical and combined processing methods" ("Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki"), Moscow: Mashinostroenie, 2005, 511 p.
9. Boldyrev A.A., Boldyrev A.I., Mandrykin A.V., Perova A.V. "Optimization of technological processes of electrochemical processing of machine parts", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 2, pp. 107-113.

Submitted 10.03.2022; revised 19.04.2022

#### Information about the authors

**Aleksandr I. Boldyrev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexboldyrev@yandex.ru, tel.: +7 (906) 584-54-21, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7855-4260>  
**Alla V. Perova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: pva7@mail.ru, tel.: +7 (473) 253-09-73, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2199-3817>  
**Aleksandr A. Boldyrev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexboldyrev@yandex.ru, tel.: +7 (904) 212-61-83, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8607-5297>

## ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПРИ СОЗДАНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

С.В. Сафонов, А.В. Мандрыкин, М.Н. Давыдов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлена методология отработки производственной технологичности изделий авиакосмической техники. Данное мероприятие наиболее часто требуется при запуске в производство новых конкурентоспособных изделий. Рассмотрены показатели, входящие в оценку уровня полезности, а также типовые варианты применения критерия полезности. Разработана методология и процедура критериальной отработки технологичности осваиваемых изделий на стадии их проектирования, доводки, освоения опытных и серийных образцов. Показано, что в результате отработки технологичности ускоряется создание перспективной продукции на уровне мировых стандартов, имеющих несомненные эксплуатационные преимущества. Применение предложенной методологии отработки технологичности с использованием принципа полезности позволяет ускоренно обосновывать выбор рациональных технологических решений. Предложена новая методология выбора и назначения нетрадиционных технологических операций, позволяющих применять наиболее прогрессивные технологические процессы (ТП) комбинированной обработки ответственных деталей авиационной и ракетно-космической техники с использованием принципа полезности и подобию для технологических систем. Показаны примеры применения новой методологии при запуске в производство создаваемых перспективных изделий техники. Установлено, что подбор и критериальное обоснование выбора методов обработки в процессе отработки технологичности позволили повысить качество и эксплуатационные характеристики изделий

**Ключевые слова:** технологичность, комбинированные технологии, конкурентоспособность, авиакосмическая техника

### Введение

На первом этапе проектирования технологического процесса требуется обоснование его эффективности с учетом эксплуатационных, экономических и организационных требований. Для этого следует проанализировать уровень полезности используемых приемов обработки при минимизации сроков подготовки и затрат на освоение выбранного технологического метода. На стадии освоения выбранного приема может потребоваться уточнение тактико-технических требований к создаваемым изделиям и обоснование затрат на отработку технологичности изделия. Здесь, возможно, понадобится комбинация нескольких воздействий, обеспечивающих повышение эксплуатационных показателей. В основу этапа отработки технологичности положен предложенный авторами статьи принцип полезности, который базируется на теоретических положениях системы подобию в технике [1].

### Принципы построения и использование критерия полезности

Критерий полезности является объективной оценкой рациональности выбора техноло-

гического приема, объединяющий как внешние, так и внутренние воздействия на эксплуатационные свойства изделий, хотя при этом может возникать снижение некоторых показателей (например, экономических) в процессе освоения новых изделий и выпуска серийной продукции.

Для обоснования главного и наиболее эффективного технологического воздействия используется оценка с применением критериев, где принцип полезности [2] лежит в основе построения методологии отработки производственной технологичности для получения объектов машиностроения с требуемыми эксплуатационными характеристиками. В результате должна быть достигнута стадия получения поверхностного слоя, обеспечивающего эксплуатационные показатели не ниже установленных для уровня конкурентоспособности осваиваемого изделия.

Показатели, которыми можно оценить степень полезности, следующие:

$P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pn}$  – определяющие состояния поверхностного слоя перспективного изделия для оценки заданных эксплуатационных показателей;

$n$  – количество используемых показателей;

$P_{o1}, P_{o2}, \dots, P_{on}$  – полученные в настоящий момент времени;

$P_{\partial 1}, P_{\partial 2}, \dots, P_{\partial n}$  – теоретически обоснованные показатели технологических методов по-



вышения эксплуатационных характеристик в ближайшей перспективе при создании новой техники;

$K_{o1}, K_{o2}, \dots, K_{on}; K_{o1}, K_{o2}, \dots, K_{om}$  – векторные коэффициенты уровня полезности применяемого воздействия на уже достигнутый и достижимый в перспективе эксплуатационный показатель, зависящие от свойств поверхностного слоя изделий;

$m$  – количество применяемых технологических воздействий;

$\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m$  – коэффициент полезности, показывающий достижения нового качественного уровня изделия от внедрения новых технологических методов и способов, направленных на совершенствование поверхностного слоя;

$\vec{K}'_1, \vec{K}'_2, \dots, \vec{K}'_m$  – коэффициент, учитывающий негативное воздействие на эксплуатационные показатели от применяемых технологических методов.

Надо учитывать, что:

$$\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\vec{K}'_1, \vec{K}'_2, \dots, \vec{K}'_m \rightarrow \min \quad (2)$$

Критерий полезности в обобщенном виде:

$$\vec{K}_{o1}(\vec{K}'_{o1})\Pi_{o1} \geq \Pi_{p1},$$

$$\vec{K}_{o2}(\vec{K}'_{o2})\Pi_{o2} \geq \Pi_{p2}, \quad (3)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\vec{K}_{om}(\vec{K}'_{om})\Pi_{on} \geq \Pi_{pn}.$$

Для анализа результатов применения критерия полезности могут быть использованы зависимости, приведенные в (1), (2) и (3) для оценки воздействия как эффективных технологических приемов (условие (1)), так и негативных показателей (условие (2)), включая взаимное влияние факторов  $\vec{K}_1, \vec{K}_1, \dots, \vec{K}_n, \vec{K}_n$ . При этом граничные условия (1, 2, 3) во всех рассматриваемых вариантах обработки должны выполняться.

Предельные показатели осваиваемой продукции оцениваются с учетом масштаба выпуска, а также затрат на материалы и время при разработке и освоении наукоемкой техники. В табл. 1 и 2 рассмотрена система критериальной оценки уровня полезности.

В табл. 1 показаны значения  $\vec{K}_{po}$  и  $\vec{K}_{go}$  для оценки рассматриваемых технологических воздействий. Отдельно должна быть оценена значимость негативных факторов при использовании рассматриваемых воздействий (трудоемкости, дефицитности, электрических и физических свойств материала, эрозионной стойкости и др.).

Таблица 1

Типовые варианты применения критерия полезности

Главный эксплуатационный показатель	Применяемые технологические воздействия	$\vec{K}_{po}$		$\vec{K}_{go}$		Примечание
		min	max	min	max	
1	2	3	4	5	6	7
Ремонтопригодность	Электрические методы нанесения покрытий и модификации поверхностного слоя	1,2	5	5	10	Металлический инструмент
	Совместимость материалов инструмента и покрытия	0,5	1,0	0	0,3	Критерии $\vec{K}_{po}, \vec{K}_{go}$
Степень освоения (с учетом зарубежного опыта)	Технико-экономическая оценка	1,1	1,5	1,0	6	

Создан системный подход для количественной оценки уровня значимости рассматриваемых вариантов обработки по коэффициентам, предлагаемым в табл. 1. При назначении численных показателей (табл. 1 и 2) учитывались условия работы деталей двигателей летательных аппаратов, турбин транспортной техники. Приведены пути снижения воздействия

негативных факторов используемых технологических процессов и возможность применения технологических методов для восстановления эксплуатационных характеристик поверхностного слоя. Особое место уделено использованию комбинированных электрических методов [3], которые являются составной частью современных технологий в машиностроении.

Таблица 2

Критерии полезности технологических воздействий для применяемых деталей						
Главный показатель критерия полезности	Технологические воздействия	$\overrightarrow{K_{po}}$		$\overrightarrow{K_{go}}$		Примечание
		min	max	min	max	
1	2	3	4	5	6	7
Жаропрочность и жаростойкость	Металлические однородные покрытия	1,2	2,0	4	20	Специальные сплавы
	Комбинированные покрытия с включениями	1,2	3,0	5	100	
Износостойкость	Покрытия с повышенными требованиями	2	10	12	30	Черные и цветные металлы
	Модификация поверхностного слоя	5	30	10	50	
Усталостная прочность	Упрочняющие технологии	1,2	1,5	2,0	3,0	Металлические изделия, работающие при многоцикловых воздействиях
	Модификация поверхностного слоя	1,2	1,5	2,0	3,0	
Оптические, электрофизические, химические и другие свойства	Покрытия с однородным и комбинированным составом	1,5	3,0	5	10	Изделия приборостроения, радиотехнической и другой техники
		2	3,5	4	12	
Уровень негативных факторов	Эксплуатационные воздействия	0,5	1,0	0	1,0	Электрические методы обработки

Численные значения рассматриваемых факторов справедливы для проектирования технологий в единичном и мелкосерийном производстве, где даже только одно главное (генеральное) воздействие способно обеспечивать качество поверхностного слоя с уровнем не ниже требуемого для значимого эксплуатационного показателя.

Проектирование комбинированных методов осуществляется сочетанием уже освоенных

и новых прогрессивных воздействий по эксплуатационным показателям. Поэтому, при проектировании нового комбинированного технологического процесса для любого выбранного главного показателя можно получить несколько вариантов воздействий с положительными ( $\overrightarrow{K_l}$ ) и негативными ( $\overleftarrow{K_l}$ ) показателями. Выбор основополагающего технологического воздействия и проектирование новых комбинированных технологий возможно обеспечить путем ранжирования воз-

действий перебором их сочетаний по 2-3 видам с учетом как положительных, так и отрицательных воздействий. Такой подход наиболее применим и необходим для типовых технических объектов машиностроения (металлорежущий инструмент, оборудование, наукоемкие детали ракетной и авиакосмической отрасли, при реновации оборудования и изделий основного производства).

Для оценки результатов отработки технологичности применяют следующие уровни полезности:

- первый уровень - с использованием коэффициента  $\overrightarrow{K_{po}}$ , позволяет оценить изменение эксплуатационных показателей от замены уже имеющихся и применяемых разработчиком методов на более перспективные, созданные позднее и освоенные в производстве

$$\overrightarrow{K_{po}} = \frac{P_o}{P_p}; \quad (4)$$

- второй уровень позволяет сделать численную оценку уровня полезности и потенциала перспективных разработок. Это способствует увеличению показателей по сравнению с другими видами известных воздействий (коэффициент  $\overrightarrow{K_{др}}$ )

$$\overrightarrow{K_{др}} = \frac{P_d}{P_p} \text{ при } \overrightarrow{K_{др}} > \overrightarrow{K_{po}}. \quad (5)$$

Критериальная оценка полезности прежде всего применима для ускоренного подбора или проектирования технологических процессов изготовления деталей ракетных двигателей, требующих покрытий с высокими теплозащитными свойствами.

Для технико-экономического обоснования создаваемых комбинированных методов обработки требуется выполнение критериев:

$$Zo \leq Zp \quad (6)$$

$$To \leq tp, \quad (7)$$

где  $Zo$  - затраты на приобретение (при необходимости) нужных технологий;

$Zp$  - финансирование, требуемое для освоения рассматриваемых вариантов технологических процессов;

$to$  - длительность освоения, требуемая для подготовки производства предлагаемых процессов;

$tp$  - длительность освоения рассматриваемого процесса при необходимости выполнения дополнительных испытаний и корректировки срока начала поставки серийных изделий.

Эффективность применения принципа полезности проявилась, в основном, при отработке производственной технологичности в авиакосмической технике.

На рис. 1, 2 приведены детали основного производства двигателей, которые выполнялись металлическим и абразивным инструментом по традиционной технологии и комбинированными методами, выбираемыми с использованием принципов полезности и подобия в машиностроении [4, 5].

Анализ детали на рис. 1 с нанесенными на деталь многослойными теплозащитными эрозийноустойчивыми покрытиями послужил основанием для создания новых технологий, обеспечивающих повышение ресурса камер сгорания современных ракетных двигателей.

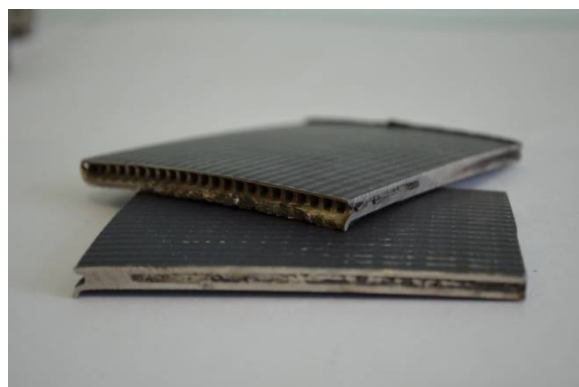


Рис. 1. Многослойная деталь камеры сгорания двигателя

Отработка технологичности детали, приведенной на рис. 1, позволила назначать эффективные технологические операции, в том числе с использованием комбинированных методов, что расширило область получения качественных изделий с размерами до 1500 мм.

На рис. 2 показана форсунка для подачи горючего в зону горения. Подбор и критериальное обоснование выбора методов обработки в процессе отработки технологичности позволили повысить качество и эксплуатационные характеристики изделий.



Рис. 2. Форсунка для подачи двухкомпонентного топлива

При отработке технологичности требуется учесть показанные выше ограничения и выполнить технико-экономическое обоснование главного воздействия по методике, предлагаемой в статье. Учитывать необходимо эксплуатационные показатели, а также достигнутый и достижимый в перспективе уровень, основанный на внедрении новейших технологических методов, способов и устройств, многие из которых находятся на уровне изобретений и патентов ведущих ученых. Для реализации новых идей и изобретений в создаваемых комбинированных технологических процессах необходимо четкое обоснование целесообразности экономических, материальных и временных затрат, поскольку достижимый уровень эксплуатационных показателей может быть не всегда полезным. Поэтому всегда необходима детальная проработка новых идей и технологических методов, создаваемых в период освоения новейших создаваемых изделий. Такой процесс в авиационной и ракетно-космической отрасли происходит на постоянной основе и требует обеспечения преемственности доведенных до

стадии внедрения достижимых показателей при переходе на новые объекты производства.

### Заключение

Разработана методология и процедура критериальной отработки технологичности осваиваемых изделий на стадии их проектирования, доводки, освоения опытных и серийных образцов, в основном, для авиакосмической техники. Показано, что в результате отработки технологичности ускоряется создание перспективной продукции на уровне мировых стандартов, имеющих несомненные эксплуатационные преимущества. Применение предложенной методологии отработки технологичности с использованием принципа полезности позволяет ускоренно обосновывать выбор рациональных технологических решений.

### Литература

1. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2005. 320 с.
2. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2015. 232 с.
3. Григорьев С.Н., Смоленцев Е.В., Волосова М.А. Технология обработки концентрированными потоками энергии. Ст. Оскол: ТНТ, 2011. 280 с.
4. Сафонов С.В., Григорьев С.Н., Смоленцев В.П. Повышение эксплуатационных свойств изделий путем нанесения или удаления покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 3. С. 15-23
5. Properties of high-Temperature Coatings Plotted on Aluminum alloys/ В.П. Смоленцев, А.В. Перова, С.В. Сафонов, Е.С. Бобров // Вестник РГАТУ им. П. Соловьева. 2014. № 2. С. 91-96.

Поступила 11.03.2022; принята к публикации 15.04.2022

### Информация об авторах

**Сафонов Сергей Владимирович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kafedra-ao@mail.ru  
**Мандрыкин Андрей Владимирович** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: Andrey-Man@inbox.ru  
**Давыдов Максим Николаевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ndtesting0@gmail.com

## DEVELOPMENT OF MANUFACTURABILITY IN THE CREATION OF COMPETITIVE AEROSPACE TECHNOLOGY

S.V. Safonov, A.V. Mandrykin, M.N. Davydov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia



**Abstract:** the methodology of testing manufacturability of aerospace products is presented. It is most often required when launching new competitive products. We considered the indicators included in the assessment of the level of utility, as well as typical options for applying the utility criterion. We developed a methodology and procedure for criteria-based testing of the manufacturability of mastered products at the stage of their design, development of prototypes and serial samples. We showed that as a result of the development of manufacturability, the creation of promising products at the level of world standards, which have undeniable operational advantages, is accelerated. The application of the proposed methodology for testing manufacturability using the principle of utility allows you to quickly justify the choice of rational technological solutions. We propose a new methodology for the selection and assignment of non-traditional technological operations, allowing the use of the most advanced technological processes for the combined processing of critical parts of aviation and rocket-space technology using the principle of utility and similarity for technological systems. We showed examples of the application of the new methodology when launching the created promising products of technology. We established that the selection and criteria-based justification of the choice of processing methods in the process of developing manufacturability made it possible to improve the quality and performance characteristics of products

**Key words:** manufacturability, combined technologies, competitiveness, aerospace engineering

#### References

1. Bez'yazychnyy V.F. "Similarity method in mechanical engineering technology" ("Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya"), Moscow: Mashinostroenie, 2005, 320 p.
2. Safonov S.V. "Technological support of operational characteristics of products" ("Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh kharakteristik izdeliy"), Voronezh State University, 2015, 232 p.
3. Grigor'ev S.N., Smolentsev E.V., Volosova M.A. "Technology of processing with concentrated energy flows" ("Tekhnologiya obrabotki kontsentririrovannymi potokami energii"), St. Oskol: TNT, 2011, 280 p.
4. Safonov S.V., Grigoriev S.N., Smolentsev V.P. "Improving the operational properties of products by applying or removing coatings", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, no 15, pp 15-23.
5. Smolentsev V.P., Perova A.V., Safonov S.V., Bobrov E.S. "Properties of high-temperature coatings plotted on aluminum alloys", *Bulletin of the Russian State Technical University named after P. Solov'yov*, 2014, no. 2, pp. 91-96.

Submitted 11.03.2022; revised 15.04.2022

#### Information about the authors

**Sergey V. Safonov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kafedra-ao@mail.ru

**Andrey V. Mandrykin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Andrey-Man@inbox.ru

**Maksim N. Davydov**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ndtesting0@gmail.com