

---

---

# ДОКЛАДЫ БГУИР

---

---

**Выходит два раза в квартал**

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,  
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010 г.*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь  
для опубликования результатов диссертационных исследований,  
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

**Главный редактор**

**Вадим Анатольевич Богуш**

Ректор Белорусского государственного университета  
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

**Редакционная коллегия:**

**Л.М. Лыньков** (зам. главного редактора),  
**А.Н. Осипов** (зам. главного редактора),  
**Т.В. Борботько** (ответственный секретарь),  
**М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович,**  
**В.К. Конопелько, А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов,**  
**В.В. Муравьев, Ю.В. Писецкий, А.С. Сигов, М.М. Татур**

**Редакционный совет:**

**И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус,**  
**И.В. Боднар, С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков,**  
**В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк,**  
**В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, В.А. Куренев,**  
**В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, В.Е. Матюшков, Ф.И. Пантелеенко,**  
**В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль**  
**В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик**

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: [www.doklady.bsuir.by](http://www.doklady.bsuir.by); e-mail: [doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by)

## СОДЕРЖАНИЕ

### *ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА*

<b>Лобатый А.А., Татур М.М., Ибрагим А.К.</b> Вероятностный анализ срыва автосопровождения видеосистемой мобильного робота .....	5
<b>Горошко С.М., Ползунов В.В.</b> Экспериментальное определение минимальных флуктуаций частоты на выходе синхронизированного генератора .....	15
<b>Mukha V.S., Kako N.F.</b> Dual Control of the Extremal Multidimensional Regression Object .....	21
<b>Якимов А.И., Денисевич Д.А., Якимов Е.А.</b> Автоматизация проектирования карт раскроя листовых материалов в условиях производства .....	31

<b>Гога А.В., Позняк А.А., Завадский С.М., Голосов Д.А., Плиговка А.Н.</b> Анодная композиционная наноструктура: формирование, морфология, оптические и фотолюминесцентные свойства.....	40
<b>Косарева А.А., Камлач П.В., Ковалев В.А.</b> Определение схожего анатомического участка на КТ-изображении грудной клетки с использованием традиционных методов выделения признаков изображения.....	48
<b>Дворников О.В., Чеховский В.А., Кунц А.В., Павлючик А.А.</b> Особенности проектирования зарядочувствительных усилителей на арсенид-галлиевом базовом кристалле .....	57
<b>Малевич И.Ю., Лопатченко А.С., Шукевич Т.В.</b> Самоходный подповерхностный радиолокационный обнаружитель малоуглубленных объектов.....	65
<b>Драпеза А.И., Лазарук С.К., Скороход Г.А., Лобан В.А., Ореховская Т.И., Хмельницкий А.И., Гудкова Е.И., Долбик А.В.</b> Изучение электрокинетических возможностей сепарации и концентрирования бактерий ( <i>S.aureus</i> ) в цельной крови четырехэлектродным биосенсорным чип-форматом с прозрачными микроэлектродами .....	73
<b>Янцевич М.А., Свириденко А.А.</b> Способ совершенствования методики синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств.....	82
<b>Василевич В.П., Збышинская М.Е.</b> Особенности структуры и схемотехники автономной фотоэлектрической установки с аккумуляторно-емкостным накопителем энергии.....	90
<b>Приложение</b> .....	99

Ответственный секретарь редакции Т. В. Мироненко

Корректор Л. В. Кондакова

Специалист по компьютерному дизайну и верстке А. Д. Гурбо

---

Подписано в печать 25.08.2022. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 9,8. Тираж 100 экз. Заказ 148.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

---

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

---

---

# DOKLADY BGUIR

---

---

**Published twice quarterly**

The journal is being published since January, 2003

*The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. No. 1087.*

The journal included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Researches in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index (RSCI)

**Chief Editor**

**Vadim Anatol'evich Bogush**

Rector of the Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Editor office address: P. Brovka St., 6, off. 326,  
Minsk, 220013, Republic of Belarus

Editor office phone number: +375-17-293-88-41

Web-site: [www.doklady.bsuir.by](http://www.doklady.bsuir.by); e-mail: [doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by)

## CONTENTS

### *ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS*

<b>Lobaty A.A., Tatur M.M., Ibrahim A.K.</b> Probabilistic Analysis of the Auto Tracking Failure by the Mobile Robot Video System.....	5
<b>Goroshcko S.M., Polzunov V.V.</b> Experimental Determination of the Minimum Frequency Fluctuations at the Synchronized Generator Output.....	15
<b>Mukha V.S., Kako N.F.</b> Dual Control of the Extremal Multidimensional Regression Object .....	21
<b>Yakimov A.I., Denisevich D.A., Yakimov E.A.</b> Design Automation of Sheet Materials Cutting Maps in a Production .....	31
<b>Hoha A.V., Poznyak A.A., Zavadski S.M., Golosov D.A., Pligovka A.N.</b> Anodic Composite Nanostructure: Formation, Morphology, Optical and Photoluminescent Properties .....	40
<b>Kosareva A.A., Kamlach P.V., Kovalev V.A.</b> Determination of a Similar Anatomical Area on a Chest CT Image Using Traditional Image Feature Extraction Methods.....	48
<b>Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Kunts A.V., Paulyuchyuk A.A.</b> Specific Design Features of Charge Sensitive Amplifiers on Arsenide-Gallium Master Slice .....	57
<b>Malevich I.Yu., Lopatchenko A.S., Shukevich T.V.</b> Self-propelled Subsurface Radar Detector of Low-Depth Objects.....	65

<b>Drapeza A.I., Lazaruk S.K., Skorokhod G.A., Loban B.A., Orekhovskaya T.I., Khmelnitsky A.I., Gudkova E.I., Dolbik A.V.</b> Study of Electrokinetic Possibilities of Bacteria ( <i>S.aureus</i> ) Separation and Concentration by Developed Four-electrode Biosensor Chip Formats with ITO Microelectrodes in Whole Blood. ....	73
<b>Yantsevich M.A., Sviridenko A.A.</b> A Method for Improving the Technique for the Synthesis of Quasi-two Bandpass Matching Devices .....	82
<b>Vasilevich V.P., Zbyshinskaya M.Y.</b> Structure and Circuit Engineering Features of Stand-Alone Photovoltaic System with a Battery-Capacitive Energy Storage Device.....	90
<b>Application</b> .....	99



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-5-14>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 681.51.0.33

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ СРЫВА АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ ВИДЕОСИСТЕМОЙ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

А.А. ЛОБАТЫЙ<sup>1</sup>, М.М. ТАТУР<sup>2</sup>, А.К. ИБРАГИМ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 25 марта 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Статья посвящена разработке методики оценки вероятности срыва автосопровождения объекта видеосистемой мобильного робота под действием внешних факторов, обусловленных случайными колебаниями мобильной платформы. Математическая постановка задачи вероятностного анализа основана на представлении процессов, происходящих в системе, векторным стохастическим дифференциальным уравнением. Условием срыва автосопровождения считается выход отслеживаемого объекта из поля зрения видеосистемы и невозврат в него в течение заданного времени. Вероятность срыва автосопровождения зависит от динамических свойства системы слежения и описывается рекуррентной формулой, в которой учитывается вероятность нахождения объекта вне поля зрения и вероятность его невозврата. Методика расчета вероятности срыва включает в себя решение двух систем обыкновенных дифференциальных уравнений для вероятностных моментов. Одна система уравнений характеризует плотность вероятности распределения координат нахождения сопровождаемого объекта в открытой области пространства. Другая система уравнений характеризует изменение во времени плотности вероятности координат сопровождаемого объекта, находящегося за пределами поля зрения видеосистемы. Приведен упрощенный пример, который наглядно иллюстрирует эволюцию вероятностных характеристик исследуемой системы в пространстве и во времени.

**Ключевые слова:** мобильный робот, видеосистема, поле зрения, срыв автосопровождения, плотность вероятности.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Лобатый А.А., Татур М.М., Ибрагим А.К. Вероятностный анализ срыва автосопровождения видеосистемой мобильного робота. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 5-14.

## PROBABILISTIC ANALYSIS OF THE AUTO TRACKING FAILURE BY THE MOBILE ROBOT VIDEO SYSTEM

ALEXANDER A. LOBATY<sup>1</sup>, MIKHAIL M. TATUR<sup>2</sup>, ALI K. IBRAHIM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>2</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 25 March 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The article is devoted to the development of a methodology for estimating the probability of an object auto tracking failure by the mobile robot video system under the influence of external factors caused by random vibrations of the mobile platform. The mathematical formulation of the probabilistic analysis problem is based on the processes representation occurring in the system by a vector stochastic differential equation. The condition for the auto tracking failure is the exit of the tracked object from the of the video system field of view and non- return to it within a specified time. The probability of auto-tracking failure depends on the dynamic tracking system properties and is described by a recurrent formula that accounts the probability of an object being out of the field of view and the probability of its non-return. The method of calculating the failure probability includes the solution of two ordinary differential equations systems for probabilistic moments. One system of equations characterizes the probability density of tracked object location coordinates distribution in an open area of space. Another system of equations characterizes the change in time of the probability density of the tracked object coordinates, which is outside the video system field of view. A simplified example is given that clearly illustrates the evolution of the system probabilistic characteristics under the study in space and time.

**Keywords:** mobile robot, video system, field of view, auto tracking failure, probability density.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Lobaty A.A., Tatur M.M., Ibrahim A.K. Probabilistic Analysis of the Auto Tracking Failure by the Mobile Robot Video System. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 5-14.

### Введение

Мобильные роботы представляют собой самодвижущиеся шасси с технологическим оборудованием, специализированным для применения в различных областях: от оказания бытовых услуг до ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Среди наземных мобильных роботов наиболее распространенными, в отличие от шагающих и ползающих, являются колесные роботы как наиболее надежные и простые в управлении. Ближайшая перспектива для их использования – сельское хозяйство (в качестве ключевых элементов системы «точного земледелия»). Такой мобильный робот должен автономно, без непосредственного участия человека (или с минимальным участием) перемещаться по заданному маршруту и выполнять заданные операции.

В настоящее время большинство систем навигации мобильных роботов сельскохозяйственного назначения (TOPCON, TRIMBLE и др.) используют в качестве технологии позиционирования систему GPS-RTK. Она позволяет обеспечить точность указания координат робота до нескольких сантиметров, что дает возможность проведения технологических операций по автоматической обработке почвы, уходу за растениями и сбору урожая. Такие технологии уже применяются на единичных образцах серийной автотракторной техники.

Например, 29 мая 2021 года в рамках празднования 75-летия Минского тракторного завода прошла презентация макетного образца беспилотного трактора «Беларус 3523i» (рис. 1). Машина разрабатывалась совместными усилиями инженеров Минского тракторного завода и специалистов Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси. В ходе выполнения проекта создан программно-аппаратный комплекс удаленного

и автономного управления всеми системами трактора и технологическим оборудованием. Комплекс оснащен системой компьютерного зрения, на нем установлена система GPS-навигации и точного земледелия компании TOPCON, применена технология высокоскоростной передачи данных 5G. При этом роль радиолокационных и оптических датчиков сводится к обеспечению условий безопасности при эксплуатации мобильного робота.



Рис. 1. Макетный образец беспилотного трактора Беларус 3523i  
Fig. 1. The sample of driverless tractor Belarus 3523i

Однако указанный способ позиционирования имеет объективные ограничения. Во-первых, RTK-сервис является платным и требует специального оборудования для его использования. Во-вторых, мобильный робот с глобальным позиционированием не является полностью автономным (имеют место случаи, когда GPS приемники не применимы или может быть отключена спутниковая связь). Поэтому является актуальной задача позиционирования наземного робота по визуальным ориентирам.

### Профессиональные видеосистемы для автотракторной техники

Широкое распространение получила система кругового обзора EasyFit от BOSCH (<https://vimeo.com/245699742>), которая представляет собой комплект из четырех камер, устанавливаемых по периметру специальной машины. Посредством электронного концентратора формируется синтетическая картина кругового обзора, которая отображается на экране и позволяет водителю оперативно реагировать на возникающие нештатные ситуации в ходе работы (рис. 2). Система в данном исполнении является аппаратным прообразом оптической платформы для опционального оснащения функциями обнаружения препятствий и автоматического реагирования на нештатные ситуации.



Рис. 2. Пример установки видеокamer системы кругового обзора EasyFit  
Fig. 2. Example of installation of the around overview videocameras EasyFit



Рис. 3. Внешний вид комплекта системы ADAS Mobileye  
Fig. 3. Appearance of the ADAS Mobileye system kit

Система Mobileye (Израиль, <https://www.mobile-eye.ru>.) представляет собой камеру с аппаратно-реализованной видеоаналитикой (рис. 3). Она предназначена для автоматического распознавания типичных ситуаций, таких как опасность столкновения с автомобилем, находящимся впереди, движущимся или припаркованным; случайный съезд с полосы движения; возможный наезд на пешехода или велосипедиста. Как и в большинстве случаев, доступна лишь коммерческая часть информации о данной системе. Технические подробности об углах обзора и вероятности пропуска обнаруживаемых угроз, а также о причинах возможных пропусков в открытом доступе не приводятся.

Известны успешные результаты НИОКР по встраиванию таких систем в более сложные информационные системы. В частности, система ADAS Mobileye 630 была применена в качестве компонента в бортовой информационно-аналитической системе (БИАС) в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси.

Возможны два основных варианта установки видеосистемы. В первом случае видеокамера устанавливается на мобильном роботе (для простоты анализа будем полагать, что камера не имеет гиросtabilизированной платформы и поворотного механизма). Слежение осуществляется только в рамках доступного угла обзора как по азимуту, так и по углу места, а ориентир находится в зоне видимости и поля зрения камеры. Во втором случае видеосистема находится вне мобильного робота, например, на краю поля, а робот сам является ориентиром. В данном случае предполагается, что видеоданные будут обработаны, сформированы команды управления и выданы на мобильный робот. В обоих случаях имеет место автоматическое слежение видеосистемой за заданным объектом.

Следует учитывать, что угловое поле автосопровождения (поле зрения) видеосистемы существенно меньше ширины обзора и составляет для систем точного слежения всего несколько угловых градусов. Выход объекта (ориентира) под действием случайных факторов из поля зрения приводит к срыву процесса автосопровождения и требует перевода всей системы в режим поиска ориентира. Для видеосистемы мобильного робота случайными воздействиями являются вибрации робота, вызванные неровностями поверхности, по которой он перемещается, а также вибрациями работающего двигателя внутреннего сгорания [1]. Также на срыв сопровождения могут влиять частота вибрации, дальность до объекта, размер объекта, видимость объекта и т. п.

Для того чтобы сделать научно обоснованный выбор варианта оптической системы навигации как альтернативы GPS, требуется характеризовать факторы, влияющие на сопровождение видеосистемой заданного объекта, а также дать вероятностную оценку срыва сопровождения.

### Математическая постановка задачи

Система видеонаблюдения (технического зрения) мобильного робота, как и любая техническая система автоматического управления, в общем случае может быть представлена математической моделью в пространстве состояний в виде векторно-матричного стохастического уравнения в форме Ланжевена или в форме Ито [2, 3]. При этом неопределенности системы, представленные случайными процессами с заданными характеристиками, описываются с помощью формирующих фильтров, представляющих собой математические модели прохождения белого шума через соответствующее звено (элемент с заданными характеристиками). Таким образом, в результате расширения вектора состояния математическую модель видеосистемы можно представить в виде векторно-матричного уравнения

$$\dot{X}(t) = D(t)\varphi(X, t) + W(X, t)U(t) + H(X, t)\xi(t), X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где  $X(t)$  – в общем случае  $n$ -мерный случайный вектор (матрица-столбец);  $D(t)$  – матрица порядка  $n \times n$  детерминированных параметров с компонентами  $d_{kr}$ ;  $\varphi(X, t)$  – векторная;  $W(X, t)$ ,  $H(X, t)$  – матричные нелинейные функции;  $U(t)$  –  $r$ -мерная ( $r < n$ ) векторная функция управления;  $\xi(t)$  –  $n$ -мерный вектор центрированного гауссова белого шума с положительно-определенной матрицей интенсивностей  $G(t)$  и матрицей корреляционных функций  $K_\xi(t, t') = G(t)\delta(t - t')$ ,  $\delta(t)$  – дельта-функция Дирака. Заметим, что каждая в отдельности



компонента процесса  $X(t)$  не является марковским процессом, что в свое время было доказано американским математиком Дж. Дубом.

Математическая модель процессов, происходящих в системе, представленная стохастическим уравнением вида (1), позволяет исследовать и оценивать различные свойства и параметры системы, в том числе решать некоторые задачи вероятностного анализа. Однако при проведении математического моделирования случайных процессов, описываемых моделью (1), с помощью компьютерных программных пакетов на практике может возникнуть проблема получения некоррелированной последовательности случайных чисел. Известные наиболее распространенные компьютерные программы моделирования случайных процессов основаны на использовании рекуррентных формул получения последовательности «псевдослучайных» чисел и могут использоваться для приближенного решения лишь узкого круга задач имитационного моделирования процессов и систем, что усложняет процесс решения задач вероятностного анализа и получения результатов, адекватных реальным условиям. Это относится и к задачам вероятностного исследования граничных режимов работы системы.

В то же время вероятностные свойства системы полностью характеризуются уравнением для многомерной плотности вероятности  $f(X,t)$  случайного процесса  $X(t)$ . Это известное уравнение в частых производных параболического типа, описывающее изменение  $f(X,t)$  в пространстве и во времени, называется уравнением Фоккера – Планка – Колмогорова (в западных источниках – уравнение Фоккера – Планка). В общем случае в векторно-матричной форме оно имеет вид [2]:

$$\frac{\partial f(X,t)}{\partial t} = -\text{div}\pi(X,t), \quad f(X,t_0) = f_0(X_0), \quad (2)$$

где  $\pi(X,t)$  – вектор плотности потока вероятности вида

$$\pi(X,t) = A(X,t)f(X,t) - \frac{1}{2}[\nabla_x^T B(X,t)f(X,t)]. \quad (3)$$

$\nabla_x$  – векторный оператор дифференцирования (оператор градиента), который имеет вид  $\nabla_x^T = [\partial/\partial x_1, \dots, \partial/\partial x_n]$ ,  $n$  – размерность системы.

$$\text{div}\pi(X,t) = \sum_{k=1}^{ni} \frac{\partial}{\partial x_k} \pi_k(X,t). \quad (4)$$

Как видно из уравнения (2), оно полностью определяется своими локальными характеристиками – вектором сноса (иногда называют вектором переноса)  $A(X,t)$  и матрицей диффузии  $B(X,t)$ .

Получить точное решение уравнения (2) для многомерных систем практически невозможно, однако в этом нет необходимости. Уравнение (2) является основой для решения ряда задач анализа и синтеза стохастических систем.

Задача вероятностного анализа нахождения процесса  $X(t)$  в заданной области представляет собой либо задачу срыва автосопровождения, либо задачу захвата принимаемого сигнала для последующего слежения за ним. Для решения таких задач вводится в рассмотрение обобщенное уравнение Фоккера – Планка – Колмогорова для непоглощенных реализаций плотности вероятности  $f^{(1)}(X,t)$ , учитывающее поглощение реализаций процесса  $X(t)$  на границе  $U_X$  (границах) заданной области (гиперповерхности) [4].

$$\frac{\partial f^{(1)}(X,t)}{\partial t} = -\text{div}\pi^{(1)}(X,t) - \beta(X,t), \quad f^{(1)}(X,t_0) = f_0^{(1)}(X_0), \quad (5)$$

где  $\pi_i^{(1)}(X_i,t)$  – вектор плотности потока вероятности вида

$$\pi^{(1)}(X,t) = A(X,t)f^{(1)}(X,t) - \frac{1}{2}[\nabla_x^T B(X,t)f^{(1)}(X,t)], \quad (6)$$

$\beta(X,t)$ , – функция поглощения реализаций процесса  $X(t)$ .

Решение задачи определения функции поглощения  $\beta(X,t)$  основано на том, что плотность

вероятности непоглощенных реализаций процесса  $X(t)$  на границе области  $U_X$  считается равной нулю. Исходя из этого, при рассмотрении векторного процесса  $X(t)$  граничные условия формируются только для тех компонент  $X(t)$ , которые определяют границы области автосопровождения. Например, для видеосистемы это могут быть границы углового поля зрения.

Задача вероятностной оценки выхода процесса  $X(t)$  из заданной области  $U_X$  в ряде случаев сводится к анализу интенсивности  $\lambda_c(t)$  выбросов (одностороннего пересечения границ области  $U_X$ ) процесса  $X(t)$  за заданную границу  $C$  области  $U_X$ . В работе [5] получено выражение для определения интенсивности выбросов процесса, описываемого уравнением (1):

$$\lambda_c(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\dot{X}}{\sqrt{D_x D_{\dot{x}}(1-r^2)}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-r^2)} \left[ \frac{(X-m_x)^2}{D_x} - \frac{2r(X-m_x)(\dot{X}-m_{\dot{x}})}{\sqrt{D_x D_{\dot{x}}}} + \frac{(\dot{X}-m_{\dot{x}})^2}{D_{\dot{x}}} \right]\right) d\dot{X}, \quad (7)$$

в котором  $m_x = m_x(t)$ ,  $m_{\dot{x}} = m_{\dot{x}}(t)$  – математические ожидания,  $D_x = D_x(t)$ ,  $D_{\dot{x}} = D_{\dot{x}}(t)$  – дисперсии  $X(t)$  и  $\dot{X}(t) = \frac{dX(t)}{dt}$ ,  $r = r(t)$  – коэффициент корреляции процессов  $X(t)$  и  $\dot{X}(t)$  соответственно. Однако такой подход не учитывает инерционность системы слежения (динамические свойства видеосистемы мобильного робота).

### Определение вероятности срыва автосопровождения

Границы поля зрения видеосистемы мобильного робота можно представить в виде прямоугольника (рис. 4), внутри которого случайным образом перемещается изображение цели (объекта наблюдения). При этом характер перемещения объекта в вертикальной и горизонтальной плоскости имеет разные характеристики, так как обусловлен различными причинами. С учетом того, что случайные внешние воздействия оказывают основное влияние в вертикальной плоскости [1], то, как правило, при решении практических задач горизонтальными случайными перемещениями системы видеонаблюдения можно пренебречь. Плотность вероятности распределения координаты объекта слежения  $y(t)$  в пределах границ  $[\alpha \beta]$  области  $U_X$  в этом случае представлена на рис. 5.

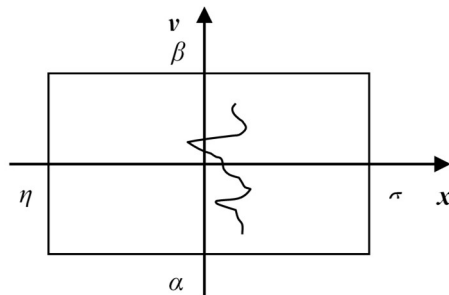


Рис. 4. Поле зрения системы видеонаблюдения  
Fig. 4. Field of view of videosystem

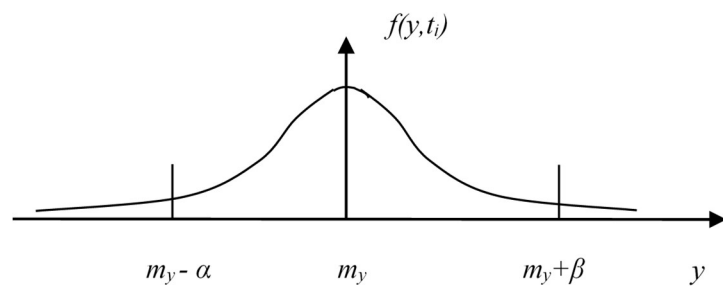


Рис. 5. Плотность вероятности распределения координаты  $y(t)$   
Fig. 5. Probability density of  $y(t)$  coordinate distribution

Задачи вероятностного анализа систем слежения решаются в ряде работ исходя из условия рассмотрения вероятности первого достижения соответствующей фазовой координатой (фазовыми координатами) границ срыва слежения (области работоспособности). В реальных системах срыв слежения не может произойти мгновенно. Инерционность перехода системы из одного состояния в другое может быть приближенно охарактеризована минимальным интервалом времени  $\tau_c$  пребывания соответствующей переменной за пределами границ области работоспособности системы, необходимым для перехода ее в другое (неработоспособное) состояние.

Учет инерционности системы при вероятностном анализе смены режима ее работы позволяет более полно учесть реальные физические свойства. В работе [6] на основе рассмотрения обобщенного уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова (5) впервые был предложен метод вероятностного анализа срыва автосопровождения, учитывающий инерционность системы слежения.

Рассмотрим математическую модель системы видеонаблюдения, описываемую уравнениями (1)–(6). Учитывая, что срыв автосопровождения происходит при условии выхода переменной  $y(t)$  из области  $U_X$  и невозвращения ее в эту область в течение заданного времени  $\tau_c$ , формула для определения вероятности срыва слежения  $P_c$  получается разбиением заданного времени функционирования системы  $t_k - t_0$  на  $k = (t_k - t_0)/\tau_c$  интервалов. При этом рассматривается последовательность интервалов  $\tau_c = t_{i+1} - t_i$  ( $i = 0, 1, \dots, k-1$ ) и для каждого момента времени  $t_i$  и интервала  $\tau_c$  определяется вероятность срыва по известной методике [6].

Так как срывы слежения на каждой из границ области  $U_X = [\alpha \beta]$  являются событиями несовместными, то вероятность срыва слежения за объектом на каждом временном интервале  $\tau_c$  определяется по формуле

$$P_c(t_{i+1} - t_i) = P_1(t_i)P_2(t_i + \tau_c | y(t_i) \notin U_X), \quad (8)$$

где  $P_1(t_i)$  – вероятность нахождения  $y(t)$  вне области  $U_X$  в момент времени  $t_i$ .

$$P_1(t_i) = 1 - \int_{U_X} f(y, t_i) dy. \quad (9)$$

Здесь  $f(y, t_i)$  – плотность вероятности распределения случайного процесса  $y(t)$  в открытой области без ограничений.  $P_2(t_i + \tau_c | y(t_i) \notin U_X)$  – вероятность невозвращения  $y(t)$  в область  $U_X$  (недостижения процессом  $y(t)$  границ области  $U_X$ ) за время  $\tau_c$  при условии нахождения  $y(t)$  в момент времени  $t_i$  вне области  $U_X$ . Для определения вероятности  $P_2$  целесообразно воспользоваться методикой, основанной на рассмотрении плотности вероятности  $f^{(1)}(y, t)$  непоглощенных реализаций процесса  $y(t)$ , которая описывается выражением (5).

При времени функционирования системы  $t_k - t_0 > \tau_c$  следует рассматривать  $r$  временных интервалов, на каждом из которых события срыва слежения являются независимыми, а вероятность их определяется формулой (8). В этом случае вероятность срыва  $P_c(t_r)$  к моменту времени  $t_r$  в общем случае определяется по формуле [6]

$$P_c(t_r) = 1 - \prod_{i=1}^r \{1 - [\sum_{j=1}^2 \{P_1^{(j)}(t_i)P_2^{(j)}(t_i + \tau_c | y(t_i) \notin U_y)\}]\}. \quad (10)$$

Здесь  $j$  – номер поглощающей границы процесса  $y(t)$  (поля зрения видеосистемы).

В соответствии с формулой (10) вероятность  $P_c(t_r)$  является дискретной неубывающей функцией моментов времени  $t_r$ . Определение значений  $P_c(t)$  в моменты времени, несовпадающие с  $t_r$ , производится путем интерполяции (экстраполяции) значений  $P_c(t_r)$ .

Для приближенного вычисления  $f(X, t)$  и  $f^{(1)}(y, t)$  используется гауссова и усеченная гауссова аппроксимация функций  $f(y, t)$  и  $f^{(1)}(y, t)$  с решением соответствующих дифференциальных уравнений для математических ожиданий и дисперсий.

В качестве простейшего примера рассмотрим одномерную систему, описываемую уравнением

$$\dot{y}(t) = Ay + \xi(t), \quad y(t_0) = y_0, \quad (11)$$

где  $A$  – коэффициент,  $\xi$  – белый шум интенсивности  $B$ . Область  $U_X$  определим следующим образом:  $\alpha \leq y \leq \beta$  (рис. 5).

Плотность вероятности распределения координаты  $y(t)$  при гауссовом начальном условии также гауссова  $f(y, t)$  с параметрами  $m_y(t)$ ,  $D_y(t)$ . Тогда вероятность  $P_1(t_i)$  в соответствии с (9) будет найдена по формуле

$$P_1(t_i) = 1 - \Phi \left[ \frac{\beta - m_y(t_i)}{\sqrt{D_y(t_i)}} \right] + \Phi \left[ \frac{\alpha - m_y(t_i)}{\sqrt{D_y(t_i)}} \right], \quad (12)$$

где  $\Phi(\dots)$  – функция Лапласа, а  $m_y(t)$  и  $D_y(t)$  определяются из уравнений:

$$\dot{m}_y = Am_y, \quad m_y(t_0) = m_{y0}, \quad (13)$$

$$\dot{D}_y = 2AD_y + B, \quad D_y(t_0) = D_{y0}. \quad (14)$$

Для определения  $P_2(t)$  в соответствии с методикой, изложенной в [4], получаем уравнение

$$\dot{P}_2 = [-\pi^{(1)}(\beta, t) - \pi^{(1)}(\alpha, t)]P_2, \quad P_2(t_i) = 1, \quad (15)$$

$$\text{где } \pi^{(1)}(y, t) = Af^{(1)}(y, t) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} [Bf^{(1)}(y, t)]. \quad (16)$$

Плотность вероятности  $f^{(1)}(y, t)$  в соответствии с допущением об усеченной гауссовой аппроксимации представим в виде

$$f^{(1)}(y, t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi D'_y}} \exp\left[-\frac{(y - m'_y)^2}{2D'_y}\right], & y < \alpha, y > \beta, \\ 0, & \alpha \leq y \leq \beta. \end{cases} \quad (17)$$

Уравнения для вероятностных моментов  $m'_y(t)$  и  $D'_y(t)$  при этом имеют следующий вид:

$$\dot{m}'_y = Am'_y - \beta\pi^{(1)}(\beta, t) - \alpha\pi^{(1)}(\alpha, t) - \frac{\dot{P}_2}{P_2} m'_y, \quad m'_y(t_i) = m_y(t_i), \quad (18)$$

$$\dot{D}'_y = 2AD'_y + B - (\beta - m'_y)^2 \pi^{(1)}(\beta, t) - (\alpha - m'_y)^2 \pi^{(1)}(\alpha, t) - \frac{\dot{P}_2}{P_2} D'_y, \quad D'_y(t_i) = D'_y(t_i). \quad (19)$$

Производную  $\partial f^{(1)}(y, t) / \partial y$  на границах  $\alpha$  и  $\beta$  для упрощения решения задачи приближенно вычисляем следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial y} [f^{(1)}(f, t)]_{y=\alpha} = -\frac{\partial}{\partial y} [f^{(1)}(f, t)]_{y=\beta} = \frac{f^{(1)}(\alpha - \Delta y, t)}{\Delta y}, \quad (20)$$

где  $\Delta y$  – малое приращение координаты  $y$ .

Результаты математического моделирования данного примера, выполненные в среде Mathcad, представлены на рис. 6, 7. На рис. 6 приведены графики изменения во времени вероятностей  $P_1(t) = P1_k$  и  $P_2(t) = P2i_k$  на  $i$ -х временных интервалах ( $i = \overline{1, 5}$ ). На рис. 7 приведены результаты вычисления  $P_c(t_r) = P_c(t)$  в соответствующих точках, соединенных интерполяционной кривой. Расчеты были выполнены при следующих условиях:  $A = -3, B = 2, t_0 = 0, t_k = 1 \text{ с}, \beta = -\alpha = 0,5$ .

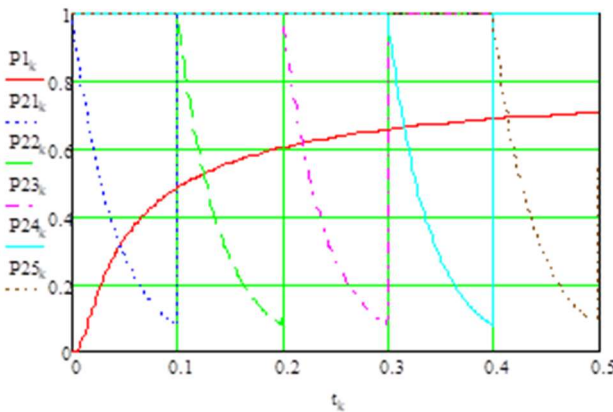


Рис. 6. Графики изменения вероятностей  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$   
Fig. 6.  $P_1(t)$  and probability plots

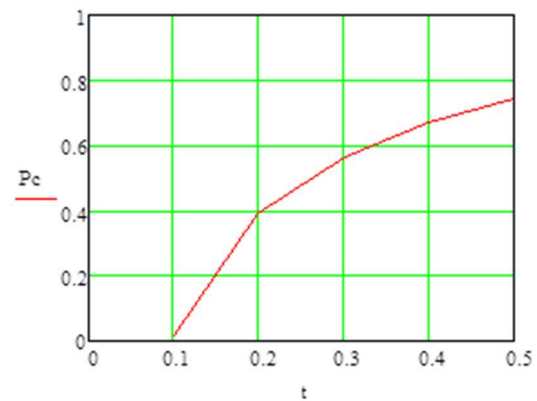


Рис. 7. График изменения вероятности  $P_c(t)$   
Fig. 7.  $P_c(t)$  probability plot

Результаты математического моделирования дают качественную иллюстрацию характера изменения вероятностных характеристик процесса срыва слежения видеосистемой за объектом. При рассмотрении задачи для случая, когда координата объекта, за которым следит видеосистема, является двумерной, а шум  $\xi(t)$  – не белый, необходимо расширить вектор состояния. При этом увеличится количество уравнений для вероятностных моментов, характеризующих плотности вероятности  $f(y,t)$  и  $f^{(1)}(y,t)$ .

### Заключение

Приведенная выше методика позволяет приближенно решать ряд практических задач вероятностного анализа срыва слежения с учетом динамических свойств системы. При этом точность полученного решения тем выше, чем меньше  $\tau_c$  по сравнению со временем работы системы. Данный подход дает возможность на стадии предварительного проектирования системы слежения оценить эффективность системы и сформулировать общие требования к ее характеристикам.

Заметим, что при выборе метода вероятностного анализа системы слежения следует учитывать тот факт, что чем на более поздней стадии принимаются различные допущения, тем выше достоверность полученных результатов. В нашем случае применение метода имитационного моделирования на основе решения системы стохастических уравнений (1) сразу подразумевает допущение о применении датчиков псевдослучайных чисел для моделирования случайных процессов. При решении же задачи вероятностного анализа на основе рассмотрения обобщенного уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова допущения о линейности (линеаризации) системы и дифференцируемости компонент процесса  $X(t)$ , определяющих условия срыва слежения, принимаются на более позднем этапе исследования, что может повысить достоверность полученных результатов. В идеале имеет смысл применять оба подхода, которые дополняют друг друга, так как ни одна математическая модель не может абсолютно точно и достоверно представить процессы, происходящие в сложной технической системе.

### Список литературы

1. Гурский Н.Н., Фурунжиев Р.И. *Моделирование и оптимизация колебаний многоопорных машин*. Минск: БНТУ; 2008.
2. Пугачев В.С., Синицын И.Н. *Теория стохастических систем*. Москва: Логос; 2004.
3. Пупков К.А., Егупов Н.Д. *Методы классической и современной теории автоматического управления*. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2004.
4. Казаков И.Е., Артемьев В.М., Бухалев В.А. *Анализ систем случайной структуры*. Москва: Наука; 1993.
5. Лобатый А.А., Саид Ж.М. Аналитическое моделирование граничных режимов работы стохастической системы. *Доклады БГУИР*. 2009;4(42):17-23.
6. Лобатый А.А. Вероятностный анализ срыва управления в инерционной автоматической системе. *Изв. АН СССР. Техническая кибернетика*. 1989(4):116-119.

### References

1. Gursky N.N., Furunjiev R.I. [*Modeling and optimization of vibrations of multi-bearing machines*]. Minsk: BNTU; 2008. (In Russ.)
2. Pugachev V.S., Sinitsyn I.N. [*Theory of stochastic systems*]. Moscow: Logos; 2004. (In Russ.)
3. Pupkov K.A., Yegupov N.D. [*Methods of classical and modern theory of automatic control*]. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman; 2004. (In Russ.)
4. Kazakov I. E., Artemiev V.M., Bukhalev V.A. [*Analysis of systems of random structure*]. Moscow: Science; 1993. (In Russ.)
5. Lobaty A.A., Said Zh.M Analytical modeling of boundary modes of operation of a stochastic system]. *Doklady BGUIR= Doklady BGUIR*. 2009;4(42):17-23. (In Russ.)
6. Lobaty A.A. [Probabilistic analysis of control failure in an inertial automatic system]. *Izv. USSR Academy of Sciences. Technical Cybernetics*. 1989;4:116-119. (In Russ.)

### Вклад авторов

Лобатый А.А. разработал расчетную методику вероятностного анализа системы автосопровождения.

Татур М.М. обосновал постановку задачи вероятностного анализа видеосистемы мобильного робота.

Ибрагим А.К. выполнил расчеты для примера по определению вероятности срыва автосопровождения, а также принимал участие в интерпретации результатов.

### Authors' contribution

Lobaty A.A. developed a calculation methodology for probabilistic analysis of the auto tracking system.

Tatur M.M. substantiated the formulation of the problem of probabilistic analysis of the video system of a mobile robot.

Ibrahim A.K. performed calculations for an example to determine the probability of auto tracking failure, and also he took part in the interpretation of the results.

### Сведения об авторах

**Лобатый А. А.**, д.т.н., профессор, профессор Белорусского национального технического университета.

**Татур М. М.**, д.т.н., профессор, профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Ибрагим А. К.**, аспирант Белорусского национального технического университета.

### Information about the authors

**Lobaty A. A.**, Dr. of Sci., Professor, Professor of Belarusian National Technical University.

**Tatur M. M.**, Dr. of Sci., Professor, Professor at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Ibrahim A. K.**, Postgraduate at Belarusian National Technical University.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр. Независимости, 65,  
Белорусский национальный технический  
университет;  
тел. +375-29-346-82-56;  
e-mail: lobaty@tut.by  
Лобатый Александр Александрович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti Ave., 65,  
Belarussian National Technical  
University;  
tel. +375-29-346-82-56;  
e-mail: lobaty@tut.by  
Lobaty Alexander Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-15-20>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 681.51.0.33

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ЧАСТОТЫ НА ВЫХОДЕ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА

С.М. ГОРОШКО, В.В. ПОЛЗУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 17 января 2021*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Явление синхронизации используется во многих областях науки и техники и особенно в радиотехнике. С помощью синхронизации, например, можно решать задачу стабилизации частоты мощных автогенераторов. В работе экспериментально показано, что флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора непрерывного режима не всегда соответствуют флуктуациям частоты синхронизирующего колебания даже в середине полосы синхронизации. Минимально возможные флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора определяются флуктуациями разности фаз в синхронизируемом автогенераторе, которые, в свою очередь, зависят как от внутренних причин, связанных со сложными процессами, протекающими внутри прибора, так и от внешних причин, связанных с пульсациями питающих напряжений, механическими воздействиями и параметрами синхронизирующего колебания.

**Ключевые слова:** синхронизируемый автогенератор, синхронизирующий генератор, флуктуации частоты, флуктуации фазы, флуктуации разности фаз.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Горошко С.М., Ползунов В.В. Экспериментальное определение минимальных флуктуаций частоты на выходе синхронизированного генератора. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 15-20.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE MINIMUM FREQUENCY FLUCTUATIONS AT THE SYNCHRONIZED GENERATOR OUTPUT

SERGEY M. GOROSHKO, VLADIMIR V. POLZUNOV

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 17 January 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The phenomenon of synchronization is used in many fields of science and technology, and especially in radio engineering. With the help of synchronization, for example, it is possible to solve the problem

of stabilizing the frequency of powerful self-oscillators. The paper experimentally shows that frequency fluctuations at the output of a synchronized continuous mode generator do not always correspond to frequency fluctuations of the synchronizing oscillation even in the middle of the synchronization band. The minimum possible frequency fluctuations at the output of a synchronized oscillator are determined by fluctuations in the phase difference in a synchronized oscillator. The latter, in turn, depend both on internal causes associated with complex processes occurring inside the device, and on external causes associated with pulsations of supply voltages, mechanical influences and parameters of synchronizing oscillations.

**Keywords:** synchronized oscillator, synchronized generator, frequency fluctuations, phase fluctuations, phase difference fluctuations.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Goroshcko S.M., Polzunov V.V. Experimental Determination of the Minimum Frequency Fluctuations at the Synchronized Generator Output. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 15-20.

## Введение

Уровень шума выходного сигнала передатчика и флуктуации фазы в усилителе мощности являются одними из основных характеристик, определяющих технический потенциал радиоэлектронных систем. Существует множество факторов, приводящих к флуктуациям параметров сигнала на выходе электронного прибора. В настоящее время теория не всегда позволяет вычислить спектр выходного сигнала, поэтому при исследовании шумовых характеристик электронных приборов большое значение придается экспериментальным исследованиям.

Синхронизация автогенераторов внешним более стабильным, но менее мощным сигналом, позволяет уменьшить флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора [1–3]. Однако при этом возникает задача определения предельных возможностей уменьшения флуктуаций частоты за счет внешнего воздействия.

Целью данной работы являлось определение максимально возможного повышения стабильности частоты на выходе синхронизированного генератора при синхронизации его внешним сигналом.

## Результаты экспериментов

Задачей данной работы являлось экспериментальное определение минимально возможных флуктуаций частоты на выходе синхронизированного автогенератора, работающего в непрерывном режиме, а также определение причин, влияющих на минимальный уровень, который не всегда соответствует флуктуациям синхронизирующего колебания.

В качестве синхронизируемого автогенератора использовался магнетрон непрерывного режима типа М-857. Выбор в качестве объекта исследования магнетрона М-857 определялся двумя причинами. Первая – это достаточный уровень выходного сигнала, позволяющий проводить качественные измерения флуктуаций частоты, вторая – наличие у магнетрона второго реактивного высокочастотного вывода, позволяющего точно подстраивать частоту автогенератора под частоту синхронизирующего колебания. Питание магнетрона осуществлялось двумя способами (вариантами):

- от универсального стабилизированного источника питания;
- от источника питания с повышенными на 40 дБ флуктуациями напряжения, имеющими случайный характер.

Для удобства сравнения флуктуаций частоты на выходе синхронизированного генератора с флуктуациями разности фаз в синхронизируемом генераторе спектральная плотность флуктуаций частоты пересчитывалась в спектральную плотность флуктуаций фазы по формуле

$$W_{\varphi}(F_a) = \frac{W_f(F_a), \Gamma_{\text{Ц}}^2}{F_a^2, \Gamma_{\text{Ц}}}, \quad (1)$$



где  $F_a$  – частота анализа.

Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В качестве задающего генератора (ЗГ) для исследуемого магнетрона использовался однотипный генератор с дополнительными фильтрами по цепям питания и специальными мерами по стабилизации частоты.

Использование однотипного генератора позволяло изменять в широких пределах входную мощность и кроме того изменять частоту синхронизирующего колебания в пределах 1,5 % относительно частоты синхронизируемого генератора практически без изменения выходной мощности входного сигнала.

Измерение флуктуаций частоты как выходного сигнала синхронизированного генератора, так и задающего генератора осуществлялось измерителем флуктуаций, подключаемым через волноводный переключатель либо к входному, либо к выходному тракту синхронизируемого генератора [4].

Для измерения флуктуаций разности фаз в синхронизируемом генераторе в установку включен фазовый детектор. Сигнал с выхода фазового детектора подавался на низкочастотный анализатор спектра типа СК4-13 при измерении разности фаз.

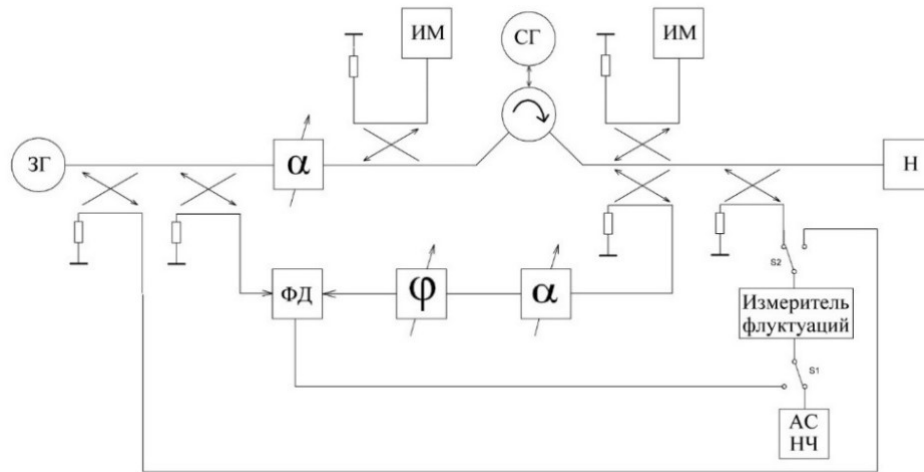


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки  
Fig. 1. Block diagram of the experimental installation

Экспериментальные зависимости спектральной плотности флуктуаций частоты (фазы) на выходе автономного и синхронизированного генераторов при различных вариантах питания синхронизируемого магнетрона приведены на рис. 2.

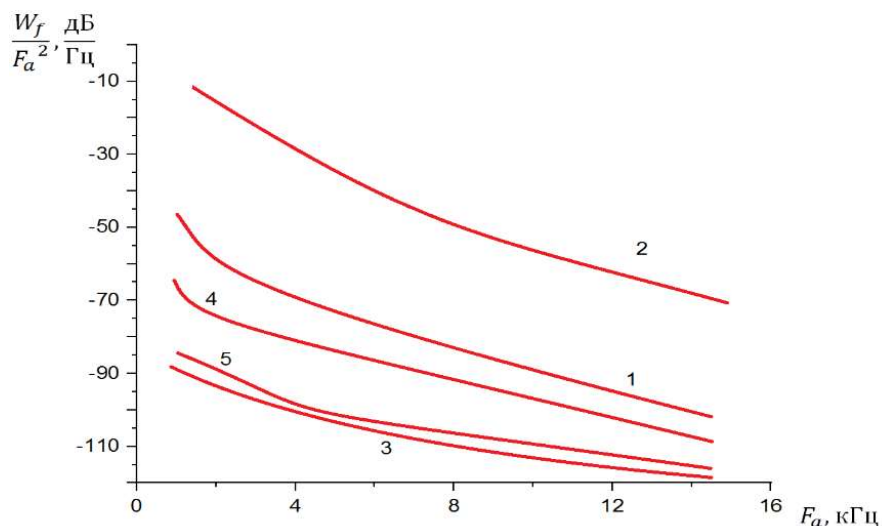
Из анализа приведенных зависимостей можно сделать следующие выводы:

– флуктуации частоты (фазы) автономного генератора при втором варианте питания (кривая 2, рис. 2) на 40 дБ выше, чем у автогенератора при первом варианте питания (кривая 1, рис. 2),

– флуктуации частоты (фазы) синхронизирующего генератора (кривая 5, рис. 2) на 40 дБ ниже, чем у синхронизируемого генератора при первом варианте питания, и составляют  $-90$  дБ/Гц на частоте анализа  $2$  кГц ( $4 \cdot 10^{(-3)} \text{ Гц}^2 / \text{Гц}$ );

– флуктуации частоты (фазы) синхронизированного генератора при первом варианте питания соответствуют флуктуациям частоты задающего генератора в исследуемом диапазоне (кривые 3 и 5, рис. 2), а при втором варианте питания они превышают флуктуации частоты задающего генератора, хотя их уровень ниже уровня флуктуаций частоты автономного генератора (кривые 2 и 4, рис. 2).

Таким образом, видно, что флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора определяются не только флуктуациями частоты синхронизирующего сигнала, но также зависят от флуктуаций частоты в автономном режиме [5].

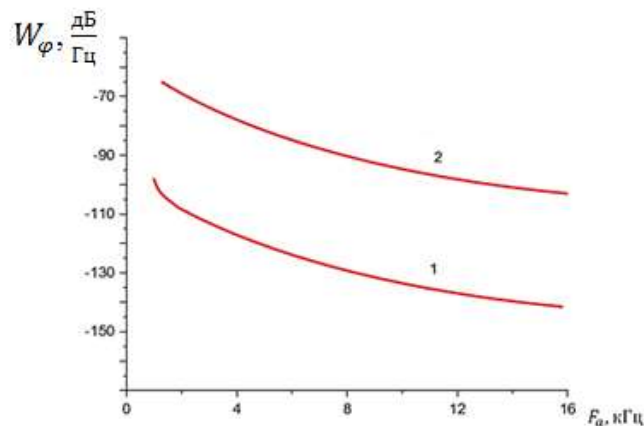


**Рис. 2.** Спектральные плотности флуктуаций частоты на выходе автономного и синхронизируемого генераторов: 1 – автономный генератор при первом варианте питания; 2 – автономный генератор при втором варианте питания; 3 – синхронизированный генератор при первом варианте питания; 4 – синхронизированный генератор при втором варианте питания; 5 – синхронизирующий (задающий) генератор

**Fig. 2.** Spectral densities of frequency fluctuations at the output of autonomous and synchronized generators: 1 – autonomous generator with the first power supply option; 2 – autonomous generator with the second power supply option; 3 – synchronized generator with the first power supply option; 4 – synchronized generator with the second power supply option; 5 – synchronizing (master) generator

Для определения минимально возможных флуктуаций частоты на выходе синхронизированного генератора были произведены измерения флуктуаций разности фаз в синхронизируемом генераторе при различных вариантах питания [6]. Уровень синхронизирующего сигнала был на 15 дБ ниже уровня мощности автономного генератора, а частота синхронизирующего сигнала равнялась частоте автономного генератора.

Зависимости спектральной плотности флуктуаций разности фаз в синхронизированном генераторе при различных вариантах питания показаны на рис. 3.



**Рис. 3.** Спектральные плотности флуктуаций разности фаз в синхронизированном генераторе: 1 – первый вариант питания; 2 – второй вариант питания

**Fig. 3.** Spectral densities of fluctuations of the phase difference in a synchronized generator: 1 – the first power option; 2 – the second power option

Из приведенных зависимостей видно, что при первом варианте питания флуктуации разности фаз в исследуемом частотном диапазоне ниже примерно на 40 дБ относительно флуктуаций разности фаз при втором варианте питания.

Сравнивая уровни флуктуаций частоты (фазы) на выходе синхронизированного генератора (рис. 2) с уровнем флуктуаций разности фаз в синхронизированном генераторе (рис. 3), можно отметить, что:

– при первом варианте питания флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора соответствуют флуктуациям частоты задающего генератора и значительно превышают флуктуации разности фаз в синхронизируемом генераторе (кривая 3, рис. 2 и кривая 1, рис. 3);

– при втором варианте питания флуктуации частоты (кривая 4, рис. 2) соответствуют флуктуациям разности фаз в синхронизированном генераторе (кривая 2, рис. 3) и превышают флуктуации частоты задающего генератора.

Из анализа приведенных зависимостей можно сделать вывод о том, что флуктуации частоты на выходе синхронизируемого генератора не всегда соответствуют флуктуациям частоты внешнего колебания. Уменьшение флуктуаций частоты на выходе синхронизированного генератора до уровня флуктуаций частоты задающего генератора возможно, если флуктуации разности фаз в синхронизируемом генераторе ниже флуктуаций частоты задающего генератора.

### Заключение

Таким образом, в работе экспериментально показано, что флуктуации разности фаз в синхронизированном генераторе определяют минимальный уровень флуктуаций частоты на его выходе при синхронизации внешним более стабильным сигналом. Для того чтобы флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора соответствовали флуктуациям частоты внешнего колебания, необходимо, чтобы флуктуации разности фаз в синхронизируемом генераторе были бы меньше флуктуаций задающего генератора. В противном случае флуктуации частоты на выходе синхронизированного генератора будут определяться флуктуациями разности фаз в синхронизированном генераторе и превышать флуктуации частоты синхронизирующего колебания. В свою очередь, флуктуации разности фаз зависят как от внутренних причин, связанных со сложными физическими процессами, протекающими внутри прибора, так и от внешних причин, связанных с пульсациями питающих напряжений, механическими воздействиями и параметрами синхронизирующего колебания. Для стабилизации фазового набега в синхронизированном генераторе возможно применение как схем автоматической подстройки фазы, так и схем, использующих различные компенсационные методы.

### Список литературы

1. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: «Радио и связь», 4-е изд. 2006.
2. Хотунцев Ю.Л., Тамарчак Д.Я. *Синхронизированные генераторы и автодины на полупроводниковых приборах*. М.: Радио и связь; 1982.
3. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. *Синхронизация: фундаментальное нелинейное явление*. М.: Техносфера; 2003.
4. Рен У. Синхронизация связанных гармонических генераторов с локальным взаимодействием. *Автоматика*. 2008;44(12):3195-3200.
5. Parks P.C., Hahn V. *Stability Theory*. Qrentice-Hall, NY, USA; 1993.
6. Емельянов В.В., Емельянова Ю.П. Взаимная синхронизация двух связанных генераторов с запаздыванием. *Изв. вузов «ПНД»*. 2013;21(3):52-60.

### References

1. Gonorovsky I.S. [*Radio engineering circuits and signals*]. M.; “Radio i Svyaz”, 4-e izd. 2006. (In Russ.)
2. Khotuntsev Yu.L., Tamarchak D.Ya. [*Synchronized generators and autodyne on semiconductor devices*]. M.: Radio and communications; 1982. (In Russ.)
3. Pikovskiy A., Rosenblum M., Kurts Yu. [*Synchronization: a fundamental non-linear phenomenon*]. M.: Technosfera; 2003. (In Russ.)
4. Ren W. [Synchronization of coupled harmonic oscillators with local interaction]. *Automatica*. 2008;44(12): 3195-3200. (In Russ.)
5. Parks P.C., Hahn V. *Stability Theory*. Qrentice-Hall, NY, USA; 1993.
6. Emelyanov V.V., Emelyanova Yu.P. [Mutual synchronization of two coupled generators with delay]. *Izv. universities “PND”*. 2013;21(3):52-60 (In Russ.)

### Вклад авторов

Ползунов В.В. осуществил постановку задачи для проведения исследования, подготовил рукопись статьи.

Горошко С.М. выполнил изготовление образцов и построение графиков, провел экспериментальные исследования.

### Authors' contribution

Polzunov V.V. carried out the formulation of the problem for the study, prepared the manuscript of the article.

Goroshko S.M. performed the production of samples and construction of graphs, conducted experimental studies.

### Сведения об авторах

**Горошко С.М.**, инженер-электроник кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Ползунов В.В.**, к.т.н., доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

**Goroshcko S.M.**, Engineer at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Polzunov V.V.**, Cand. of Sci., Associate Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
тел. +375-29-377-38-74;  
e-mail: polzunov@gmail.com  
Ползунов Владимир Васильевич

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-29-377-38-74;  
e-mail: polzunov@gmail.com  
Polzunov Vladimir Vasil'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-21-30>

Original paper

UDC 681.51

## DUAL CONTROL OF THE EXTREMAL MULTIDIMENSIONAL REGRESSION OBJECT

VLADIMIR S. MUKHA, NANCY F. KAKO

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 4 March 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The statement of the problem of the dual control of the regression object with multidimensional-matrix input and output variables and dynamic programming functional equations for its solution are given. The problem of the dual control of the extremal regression object, i.e. object response function of which has an extremum, is considered. The purpose of control is reaching the extremum of the output variable by sequential control actions in production operation mode. In order to solve the problem, the regression function of the object is supposed to be quadratic in input variables, and the inner noise is supposed to be Gaussian. The sequential solution of the functional dynamic programming equations is performed. As a result, the optimal control action at the last control step is obtained. It is showed also that the optimal control actions obtaining at the other control steps is connected with big difficulties and impossible both analytically and numerically. The control action obtained at the last control step is proposed to be used at the arbitrary control step. This control action is called the control action with passive information accumulation. The dual control algorithm with passive information accumulation was programmed for numerical calculations and tested for a number of objects. It showed acceptable results for the practice.

**Keywords:** dual control, multidimensional-matrix regression object, dynamic programming, passive information accumulation, extremal control systems.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Mukha V.S., Kako N.F. Dual Control of the Extremal Multidimensional Regression Object. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 21-30.

### Introduction

The problem of the dual control of the multidimensional regression object is formulated as follows [1–5]. The control system with controlled object  $O$ , controller  $C$ , feedback path and driving action  $g_s$  is considered (Fig. 1).

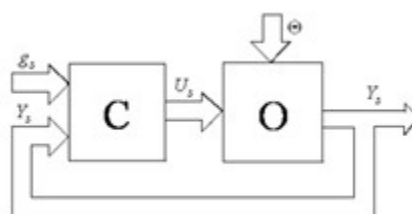


Fig. 1. To the statement of the dual control problem

The controlled object  $O$  is described at the instant of time  $s$  by the probability density function

$$f_{Y_s}(y_s, \Theta, U_s), \quad s = 0, 1, 2, \dots, n,$$

where  $Y_s = (Y_{i_1, i_2, \dots, i_p, s})$  is the  $p$ -dimensional matrix of the output of the object at the instant of time  $s$ ,  $U_s = (U_{i_1, i_2, \dots, i_q, s})$  is the  $q$ -dimensional matrix of the input of the object at the instant of time  $s$  (control action),  $\Theta = \{\Theta_1, \dots, \Theta_m\}$  is a set of the parameters of the controlled object consisting of the random multidimensional matrices  $\Theta_1, \dots, \Theta_m$  with known priory joint probability density function  $f_{\Theta, 0}(\theta)$ . We will call the set  $\Theta = \{\Theta_1, \dots, \Theta_m\}$  a generalized parameter of the object  $O$ . It is supposed, that the generalized parameter  $\Theta$  takes constant value for all of the instants of time  $s = 0, 1, \dots, n$ . The driving action  $g_s$  is supposed to be known deterministic multidimensional-matrix sequence.

The quality of the functioning of the system at each instant of time  $s$  is estimated by a specific loss function  $W_s(Y_s, g_s)$ , depending of output  $Y_s$  and, might, driving action  $g_s$ . A system, for which the total for  $n+1$  instants of time total average risk

$$R = E\left\{\sum_{s=0}^n W_s(Y_s, g_s)\right\} = \sum_{s=0}^n R_s, \quad R_s = E(W_s(Y_s, g_s)), \quad (1)$$

is minimal, is called optimal system. There  $E(\cdot)$  means the mathematical expectation,  $R_s = E(W_s(Y_s, g_s))$  is a specific risk. The control action  $U_s$  belongs to some permissible area. The controller  $C$  uses all of the past information in the form of observations  $\vec{u}_{s-1} = (u_0, u_1, \dots, u_{s-1})$ ,  $\vec{y}_{s-1} = (y_0, y_1, \dots, y_{s-1})$  of the input and output values of the object to determine the control action  $u_s$  at the instant of time  $s$ .

The task consists of determining the strategies of the controller  $C$ , i.e. sequence of the conditional probability density functions  $f_{U_s}(u_s / \vec{u}_{s-1}, \vec{y}_{s-1})$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ , for which the total average risk  $R$  (1) is minimal.

As it is known [2–5], the optimal strategies of the controller  $C$  are not randomized, i.e. the control actions  $U_s$  are not random and will be denoted  $u_s$ . In this conditions the controller  $C$  will be described by conditional probability density function  $f_{Y_s}(y_s / \theta, u_s)$ , where  $u_s$  is the fixed value of the variable  $U_s$ . We will use the following simplified notation:  $f_{\Theta, 0}(\theta) = f_0(\theta)$ ,  $f_{Y_s}(y_s / \theta, u_s) = f(y_s / \theta, u_s)$ .

The optimal control algorithm, i.e. the sequence of the control actions  $u_n, u_{n-1}, \dots, u_0$  is determined in pointed inverse order from the following functional equations:

$$f_n^*(\vec{u}_{n-1}, u_n^*, \vec{y}_{n-1}) = \min_{u_n \in \bar{U}} \varphi_n(\vec{u}_{n-1}, \vec{y}_{n-1}), \quad (2)$$

$$f_{n-m}^*(\vec{u}_{n-m-1}, u_{n-m}^*, \vec{y}_{n-m-1}) = \min_{u_{n-m} \in \bar{U}} [\varphi_{n-m}(\vec{u}_{n-m-1}, \vec{y}_{n-m-1}) + \int_{\Omega(y_{n-m})} f_{n-m+1}^*(\vec{u}_{n-m}, u_{n-m+1}^*, \vec{y}_{n-m}) f(y_{n-m} / \vec{u}_{n-m}, \vec{y}_{n-m-1}) d\Omega], \quad m = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

where  $\varphi_s$  is determined by expression

$$\varphi_s(\vec{u}_s, \vec{y}_{s-1}) = \int_{\Omega(\vec{y}_s)} W_s(y_s, g_s) f(y_s / \vec{u}_s, \vec{y}_{s-1}) d\Omega, \quad s = 0, \dots, n, \quad (4)$$

$$\text{in which } f(y_s / \vec{u}_s, \vec{y}_{s-1}) = \int_{\Omega(\theta)} f(y_s / \theta, u_s) f_s(\theta) d\Omega, \quad (5)$$

$$f_s(\theta) = \frac{f_0(\theta) \prod_{v=0}^{s-1} f(y_v / \theta, u_v)}{\int_{\Omega(\theta)} f_0(\theta) \prod_{v=0}^{s-1} f(y_v / \theta, u_v) d\Omega}, \quad (6)$$

and  $u_{n-m+1}^*$  is optimal control action for the instant of time  $(n-m+1)$ .

Note. The notation  $\min_{u_n \in \bar{U}} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  means the following:

$$\min_{u_n \in \bar{U}} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \varphi_n(u_n^*, \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-1}).$$

### Dual control of the extremal regression object

Let us consider the case of dual control when the controlled object has an extremal characteristic, and the task consist of the search and support this extremal state. The task is concretized in this case as follows.

The controlled object is described at the instant of time  $s$  by the gaussian probability density function:

$$f(y_s / c, u_s) = N(\psi(c, u_s), d_Y), \quad (7)$$

where  $\psi(c, u_s)$  is the regression function,  $d_Y > 0$  is the variance of the inner noise,  $u_s$  is the  $q$ -dimensional matrix of the control action  $u_s = (u_{j(q),s})$ ,  $J(q) = (J_1, J_2, \dots, J_q)$ ,  $y_s$  is the scalar variable ( $p$ -dimensional matrix with  $p = 0$ ),  $c$  is a some set of the parameters (generalized parameter of the object). Let us note that we notation now the generalized paramener as  $c$  instead of  $\theta$  in expressions (5), (6). We suppose too that the regression function is quadratic:

$$y = \psi(C, u) = \sum_{i=0}^m {}^{0,iq} (C_i u^i) = \sum_{i=0}^m {}^{0,iq} (u^i C_{t,i}) = \psi(C_t), \quad m=2, \quad (8)$$

where  $C_i$ ,  $i = 0,1,2$ , are the  $(p+iq)$ -dimensional random matrices, at that  $C_2$  is symmetrical relative its  $q$ -multi-indexes,  $C_i = (C_{t,i})^{H_{p+iq,iq}}$ ,  $C_{t,i} = (C_2)^{B_{p+iq,iq}}$ ,  $H_{p+iq,iq}$  and  $B_{p+iq,iq}$  are the substitutions of transpose of the type “back” and “onward” respectively [6]. Provided the regrassion function (8), the probability density function of the object (7) take the following form:

$$f(y_n / c_t, u_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_Y} |d_Y|}} \exp\left(-\frac{1}{2} {}^{0,p} \left( d_Y^{-1} (y_n - \sum_{i=0}^m {}^{0,iq} (u_n^i c_{t,i}))^2 \right)\right). \quad (9)$$

For the task of the dual search of the minimum of the regression function we should to choose the loss function in the form  $W(Y_s) = Y_s$ .

Let us turn to the functional equations of the dual control (2)–(6) (with replasing  $\theta$  by  $c_t$ ) and find the control actions  $u_n, u_{n-1}, \dots, u_0$  based on these equations.

1. For first, let us find the posterior probability density function  $f_n(c_t)$  of the random cell  $C_t = \{C_{t,1}, C_{t,2}, C_{t,3}\}$  by the Bayes formula (6). We will consider the right hand part of the equality (8) with the parameters  $C_{t,1}, C_{t,2}, C_{t,3}$  and will suppose the general case, when the output variable  $y$  is  $p$ -dimensional matrix. Then  $C_{t,i}$  are  $(iq+p)$ -dimensional matrices,  $C_i$  are  $(p+iq)$ -dimensional matrices, at that  $C_{t,i} = (C_i)^{T_i}$ ,  $T_i = B_{p+iq,iq}$ , and  $C_i = (C_{t,i})^{T_i}$ ,  $T_i = H_{p+iq,iq}$ ,  $i = 0,1,2$ .

Let us agree to use below the following notations:  $i_1, i_2, \dots$  are separate indexes,  $\bar{i}_{(p)} = (i_1, i_2, \dots, i_p)$  is the set of  $p$  indexes ( $p$ -multi-index);  $\bar{i}_{(p,k)} = (\bar{i}_{(p),1}, \bar{i}_{(p),2}, \dots, \bar{i}_{(p),k})$  is the set of  $k$   $p$ -multi-indexes.

Let the random cell  $C_t = \{C_{t,k}\}$ ,  $k = \overline{0, m}$ , has the Gaussian priory probability density function described by the following expression [7]:

$$\begin{aligned} f(c_t) &= M_{\Xi} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m {}^{0,q_j} (c_{t,i} - v_{c_{t,i}}) d_{c_t}^{i,j} (\xi_j - v_{c_{t,j}})\right) = \\ &= M_{c_t} \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m {}^{0,q_j} (c_{t,i} d_{c_t}^{i,j}) c_{t,j} + \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m {}^{0,q_j} (c_{t,i} d_{c_t}^{i,j}) v_{c_{t,j}} - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m {}^{0,q_j} (v_{c_{t,i}} d_{c_t}^{i,j}) v_{c_{t,j}}\right\}, \\ M_{c_t} &= \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{n_c} |d_{c_t}|}}, \quad q_i = p + iq, \quad i = \overline{0, m}, \end{aligned}$$

where the two-dimensional cell  $d_{c_t} = \{d_{c_{t,i,j}}\}$ ,  $i, j = \overline{0, m}$ , is the variance-covariance cell of the random cell  $C_t$  [7],  $d_{c_{t,i,j}} = E\left(\left((C_{t,i} - v_{c_{t,i}})(C_{t,j} - v_{c_{t,j}})\right)\right)$  is the  $((iq + p) + (jq + p))$ -dimensional matrix,  $d_{c_t}^{-1} = \{d_{c_t}^{i,j}\}$ ,  $i, j = \overline{0, m}$ , is the cell inverse to the cell  $d_{c_t}$ ,  $v_{c_t} = \{v_{c_{t,0}}, v_{c_{t,1}}, \dots, v_{c_{t,m}}\} = \{v_{c_{t,i}}\}$ ,  $i = \overline{0, m}$ , is the one-dimensional cell of the mathematical expectation of the random cell  $C_t$ , i.e.  $v_{c_{t,i}} = E(C_{t,i})$  is the  $(iq + p)$ -dimensional matrix,  $n_c$  is the number of the scalar elements of the cell  $C_t$ . Then the posterior probability density function  $f_n(c)$  (6) is defined by the following expression [7]:

$$f(c_t / \bar{y}_{n-1}, \bar{u}_{n-1}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{n_y} |D_{c_t}|}} \exp\left(-\frac{1}{2} {}^{0,2} \{D_{c_t}^{-1,0,0} \{c_t - N_{c_t}\}^2\}\right) = f_n(c_t), \quad (10)$$

in which  $D_{c_t} = \{D_{c_{t,i,j}}\}$ ,

$$D_{c_t}^{-1} = \{D_{c_t}^{i,j}\} = \{d_{c_t}^{i,j} + S_{i,j}\} = \{d_{c_t}^{i,j} + ({}^{0,0} (d_{c_t}^{-1} S_{u'u^j}))^{T_{i,j}}\}, \quad i, j = \overline{0, m}, \quad (11)$$

$$B = \{B_i\} = \left\{ \sum_{j=0}^m {}^{0,jq+p} (d_{c_t}^{i,j} v_{c_{t,j}}) + {}^{0,p} (d_{c_t}^{-1} S_{y'u^i})^{T_i} \right\}, \quad i = \overline{0, m}, \quad (12)$$

$$N_{c_t} = \{N_{c_{t,i}}\} = {}^{0,1} \{D_{c_t} B\} = \left\{ \sum_{j=0}^m {}^{0,p+jq} (D_{c_{t,i,j}} B_j) \right\}, \quad i = \overline{0, m}, \quad (13)$$

$$S_{u^k u^\lambda} = \sum_{\mu=1}^{n-1} {}^{0,0} (u_\mu^k u_\mu^\lambda), \quad S_{y u^\lambda} = \sum_{\mu=1}^{n-1} {}^{0,0} (y_\mu u_\mu^\lambda), \quad (14)$$

$$\bar{y}_{n-1} = (y_1, y_2, \dots, y_{n-1}), \quad \bar{u}_{n-1} = (u_1, u_2, \dots, u_{n-1}).$$

The substitutions of transpose  $T_{i,j}$  in (11) and  $T_i$  in (12) have the following forms:

$$T_{i,j} = \left( \begin{array}{c} \bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots, \bar{i}_i, \bar{\lambda}, \bar{J}_1, \bar{J}_2, \dots, \bar{J}_j, \bar{\mu}, \\ \bar{\lambda}, \bar{\mu}, \bar{i}_1, \bar{i}_2, \dots, \bar{i}_i, \bar{J}_1, \bar{J}_2, \dots, \bar{J}_j \end{array} \right), \quad i, j = \overline{0, m},$$



$T_i = \left( \begin{array}{c} \bar{l}_1, \bar{l}_2, \dots, \bar{l}_i, \bar{\mu} \\ \bar{\mu}, \bar{l}_1, \bar{l}_2, \dots, \bar{l}_i \end{array} \right)$ ,  $i = \overline{0, m}$ , where the multi-indexes  $\bar{j}_1, \bar{j}_2, \dots, \bar{j}_j, \bar{l}_1, \bar{l}_2, \dots, \bar{l}_i$  contain by  $q$  indexes and the multi-indexes  $\bar{\lambda}, \bar{\mu}$  contain by  $p$  indexes. There are no multi-indexes  $\bar{\lambda}, \bar{\mu}$  in these substitutions in the case of  $p = 0$ , and substitutions  $T_{i,j}, T_i$  in this case are identical [6].

The two-dimensional cell  $D_{c_i}^{-1} = \{D_{c_i}^{i,j}\}$ ,  $i, j = \overline{0, m}$ , (11) has the same dimensions as the two-dimensional cell  $D_{c_i} = \{D_{c_i,i,j}\}$ , i.e.  $D_{c_i}^{i,j}$  is the  $((iq + p) + (jq + p))$ -dimension matrix.

The element  $B_i$  of the one-dimension cell  $B = \{B_i\}$ ,  $i = \overline{0, m}$ , (12) is the  $(iq + p)$ -dimension matrix. It is of interest in dual control to use the single measurements for updating the estimations (10)–(14).

We will have for this the following expressions:

$$S_{u_s^{k_s} u_s^{\lambda}} = {}^{0,0} (u_s^{k_s + \lambda}), \quad S_{y_s u_s^{\lambda}} = {}^{0,0} (y_s u_s^{\lambda}),$$

determined by single measurement  $(u_s, y_s)$ , instead of the expressions (14).

2. Secondly, let us find the probability density function  $f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  by the formula (5),

$$f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \int_{\Omega(C)} f(y_n / c_t, u_n) f_n(c_t) d\Omega, \quad (15)$$

where  $f_n(c_t)$  is determined by the formula (10). We will use for this the following theorem from [7]:

Theorem (total probability formula for the joint Gaussian distribution of the multidimensional random matrices). Let  $\Xi = \{\Xi_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , be an one-dimensional random cell, composed of the  $q_i$ -dimensional matrices  $\Xi_i$ ,  $k_i$  the number of the scalar components of the matrix  $\Xi_i$ ,  $f(\xi)$  the probability density function of the cell  $\Xi$ ,  $k_{\Xi} = k_1 + k_2 + \dots + k_m$  the number of the scalar components of the cell  $\Xi$ ,  $f(y / \xi)$  the condition probability density function of a  $p$ -dimensional matrix  $Y$ ,  $k_Y$  the number of the scalar components of the matrix  $Y$ ,  $E^{k_{\Xi}}$  the  $k_{\Xi}$ -dimensional Euclidean space. If in the total probability formula

$$f(y) = \int_{E^{k_{\Xi}}} f(y / \xi) f(\xi) d\xi \quad (16)$$

the conditional probability density function  $f(y / \xi)$  has the following form

$$f(y / \xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_Y} |d_Y|}} \exp\left(-\frac{1}{2} {}^{0,p} (d_Y^{-1} (y - \sum_{i=1}^m {}^{0,q_i} (h_i \xi_i))^2)\right), \quad (17)$$

where  $h_i$  is a  $(p + q_i)$ -dimensional matrix, allowing the multiplication  ${}^{0,q_i} (h_i \xi_i)$ , and the probability density function  $f(\xi)$  has the following form

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_{\Xi}} |d_{\Xi}|}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m {}^{0,q_j} ({}^{0,q_i} ((\xi_i - v_{\Xi_i}) d_{\Xi}^{i,j} (\xi_j - v_{\Xi_j})))\right\},$$

then the integral (6) (the total probability formula) is defined by the following expression:

$$f(y) = \int_{E^{k_{\Xi}}} f(y / \xi) f(\xi) d\xi = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_Y} |D_Y|}} \exp\left(-\frac{1}{2} {}^{0,p} (D_Y^{-1} (y - \sum_{i=1}^m {}^{0,q_i} (h_i v_{\Xi_i}))^2)\right), \quad (18)$$

where  $D_Y = d_Y + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m {}^{0,q_j} ({}^{0,q_i} (h_i d_{\Xi_i,j}) h_j)$ .

Let us replace  $\xi$  by  $c_i$  and  $f(\xi)$  by  $f_n(c_i)$  (10) in this theorem and compare the expression (9) with the expression (17) from theorem. We realize that  $p_i = iq$ ,  $h_i = u_n^i$ . In accordance with formula (18) of the theorem we obtain the following expression for the integral (15):

$$f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \int_{E^{k_Y}} f(y_n / c_i, u_n) f_n(c_i) dc_i = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{k_Y} |D_Y|}} \exp\left(-\frac{1}{2} {}^{0,p} (D_Y^{-1} (y_n - N_Y)^2)\right), \quad (19)$$

$$\text{where } D_Y = d_Y + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m {}^{0,jq} ({}^{0,iq} (u_n^i D_{c_i,j}) u_n^j), \quad (20)$$

$$N_Y = \sum_{i=0}^m {}^{0,iq} (u_n^i N_{c_i,i}). \quad (21)$$

The matrices  $D_{c_i,j}$  and  $N_{c_i,i}$  in (20), (21) are defined by the expressions (11), (13).

3. Thirdly, the further calculations are connected with formula (4) of the functional equations. When the loss function is  $W_n = Y_n$ , then we need to calculate the integral

$$\Phi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \int_{E^{n_Y}} y_n f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) dy_n,$$

with weight function  $f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  (19).

This integral is nothing more than posterior mean value (21):

$$\Phi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \int_{R^1} y_n f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) dy_n = \sum_{i=0}^m {}^{0,iq} (u_n^i N_{c_i,i}) = N_{c_i,0} + {}^{0,q} (u_n N_{c_i,1}) + {}^{0,2q} (u_n^2 N_{c_i,2}).$$

Returning to the case  $p = 0$  gives the equalities  $N_{c_i,1} = N_{c_i,1}$ ,  $N_{c_i,2} = N_{c_i,2}$ ,  $S_{u^k u^\lambda} = {}^{0,0} (u_{n-1}^k u_{n-1}^\lambda)$ ,  $S_{y u^\lambda} = {}^{0,0} (y_{n-1} u_{n-1}^\lambda)$ , identical substitutions  $T_{i,j}$ ,  $T_i$  and the following expression for the function  $\Phi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$ :

$$\phi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = \int_{R^1} y_n f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) dy_n = \sum_{i=0}^m {}^{0,iq} (u_n^i N_{c_i,i}) = N_{c_i,0} + {}^{0,q} (N_{c_i,1} u_n) + {}^{0,2q} (N_{c_i,2} u_n^2),$$

$$\text{where } N_{c_i} = \{N_{c_i,i}\} = {}^{0,1} \{D_{c_i} B\} = \left\{ \sum_{j=0}^m {}^{0,p+jq} (D_{c_i,i,j} B_j) \right\}, i = \overline{0, m}.$$

$$D_{c_i}^{-1} = \{D_{c_i}^{i,j}\} = \{d_{c_i}^{i,j} + S_{i,j}\} = \{d_{c_i}^{i,j} + ({}^{0,0} (d_Y^{-1} u_{n-1}^{i+j}))\}, i, j = \overline{0, m},$$

$$B = \{B_i\} = \left\{ \sum_{j=0}^m {}^{0,jq+p} (d_{c_i}^{i,j} v_{c_i,j}) + {}^{0,p} (d_Y^{-1} {}^{0,0} (y_{n-1} u_{n-1}^i)) \right\}, i = \overline{0, m},$$

This function  $\Phi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  has an extremum at the point [Appendix]

$$u_n^* = \arg \min_{u_n} \Phi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = -\frac{1}{2} {}^{0,q} \left( {}^{0,q} N_{c_i,2}^{-1} N_{c_i,1} \right), \quad (22)$$

which is the optimal control action at the last  $n$ -th instant of time. The minimal value of the function  $\Phi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  is defined by the following expression (Appendix):

$$\Phi_n(u_n^*, \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-1}) = \min_{u_n \in U} \Phi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = N_{c_i,0} - \frac{1}{4} {}^{0,q} \left( N_{c_i,1} {}^{0,q} \left( {}^{0,q} N_{c_i,2}^{-1} N_{c_i,1} \right) \right). \quad (23)$$

The search of the optimal control action  $u_n^*$  at the last  $n$ -th instant of time finished there and the search of the optimal control action  $u_{n-1}^*$  at the penultimate  $(n-1)$ -th instant of time starts. The control action  $u_{n-1}^*$  is defined by the following expression (formula (3)):

$$u_{n-1}^* = \arg \min_{u_{n-1} \in U} \left[ \varphi_{n-1}(\bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-2}) + \int_{\Omega(y_{n-1})} \varphi_n(u_n^*, \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-1}) f(y_{n-1} / \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-2}) d\Omega \right]. \quad (24)$$

The function  $\varphi_n(u_n^*, \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-1})$  (23) in (24) is subjected to integration by  $y_{n-1}$  with weight function  $f(y_{n-1} / \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-2})$  and then is minimized by  $u_{n-1}$  in sum with the  $\varphi_{n-1}(\bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-2})$ . One can show that the calculations by the expression (24) are very difficult. Indeed, the expressions for the parameters  $N_{c_i,0}$ ,  $N_{c_i,1}$ ,  $N_{c_i,2}$  of the function  $\varphi_n(u_n^*, \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-1})$  (23) have the following expanded form:

$$N_{c_i} = \left\{ \begin{array}{l} {}^{0,0}(D_{c_i,0,0}B_0) + {}^{0,q}(D_{c_i,0,1}B_1) + {}^{0,2q}(D_{c_i,0,2}B_2) \\ {}^{0,0}(D_{c_i,1,0}B_0) + {}^{0,q}(D_{c_i,1,1}B_1) + {}^{0,2q}(D_{c_i,1,2}B_2) \\ {}^{0,0}(D_{c_i,2,0}B_0) + {}^{0,q}(D_{c_i,2,1}B_1) + {}^{0,2q}(D_{c_i,2,2}B_2) \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} N_{c_i,0} \\ N_{c_i,1} \\ N_{c_i,2} \end{array} \right\}, \quad (25)$$

$$\text{where } D_{c_i}^{-1} = \left\{ \begin{array}{l} d_{c_i}^{0,0} + 1 \quad d_{c_i}^{0,1} + u_{n-1} \quad d_{c_i}^{0,2} + u_{n-1}^2 \\ d_{c_i}^{1,0} + u_{n-1} \quad d_{c_i}^{1,1} + u_{n-1}^2 \quad d_{c_i}^{1,2} + u_{n-1}^3 \\ d_{c_i}^{2,0} + u_{n-1}^2 \quad d_{c_i}^{2,1} + u_{n-1}^3 \quad d_{c_i}^{2,2} + u_{n-1}^4 \end{array} \right\}, \quad (26)$$

$$B = \{B_i\} = \left\{ \begin{array}{l} {}^{0,0}(d_{c_i}^{0,0} v_{c_i,0}) + {}^{0,q}(d_{c_i}^{0,1} v_{c_i,1}) + {}^{0,2q}(d_{c_i}^{0,2} v_{c_i,2}) + {}^{0,0}(d_Y^{-1} y_{n-1}) \\ {}^{0,0}(d_{c_i}^{1,0} v_{c_i,0}) + {}^{0,q}(d_{c_i}^{1,1} v_{c_i,1}) + {}^{0,2q}(d_{c_i}^{1,2} v_{c_i,2}) + {}^{0,0}(d_Y^{-1} y_{n-1} u_{n-1}) \\ {}^{0,0}(d_{c_i}^{2,0} v_{c_i,0}) + {}^{0,q}(d_{c_i}^{2,1} v_{c_i,1}) + {}^{0,2q}(d_{c_i}^{2,2} v_{c_i,2}) + {}^{0,0}(d_Y^{-1} y_{n-1} u_{n-1}^2) \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \end{array} \right\},$$

and the matrices  $D_{c_i,i,j}$ ,  $i, j = \overline{0, m}$ , in (25) are the elements of the cell  $D_{c_i}$  inverse to the cell  $D_{c_i}^{-1}$  (26). One can understand, that the matrices  $N_{c_i,0}$ ,  $N_{c_i,1}$ ,  $N_{c_i,2}$  (25) are very complicate functions of the matrix  $u_{n-1}$ . As a result, it is impossible to perform the analytical calculations and minimization in the expression (24). The numerical minimization in the expression (24) is impossible too.

However, the control action  $u_n^*$  (22), obtained at the last instant of time, can be used at any instant of time  $s$ . We will call the expression (22) the algorithm of the dual extremal control with passive information storage. Let us consider more general case  $p \neq 0$  and loss function  $W(Y_s) = {}^{0,p}(\alpha(Y_s - g))$ , where  $\alpha$  and  $g$  are constant  $p$ -dimensional matrices with the same dimension as the matrix  $Y$ . We have in this case the task of the dual search of the extremum of the weighted output variable of the regression function.

The calculation of the functions  $f_n(c_i)$  and  $f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  is described above (the functions (10), (19)).

The function  $\varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$ , in accordance with the formula (4), is defined by the following expression:

$$\begin{aligned} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) &= \int_{\Omega(\bar{y}_n)} W_n(Y_n) f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) d\Omega = \\ &= E(W(Y_n)) = E({}^{0,p}(\alpha(Y_n - g))) = {}^{0,p}(\alpha(E(Y_n) - g)) = {}^{0,p}(\alpha(N_Y - g)). \end{aligned}$$

Taking into account the expression (21) for the  $N_Y$ , we get:

$$\begin{aligned} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) &= \int_{E^{ny}} {}^{0,p}(\alpha(y_n - g))f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})dy_n = \left( \alpha \left( \sum_{i=0}^m {}^{0,iq}(u_n^i N_{c_i,i}) - g \right) \right) = \\ &= {}^{0,p} \left( \alpha \left( N_{c,0} + {}^{0,q}(u_n N_{c,1}) + {}^{0,2q}(u_n^2 N_{c,2}) - g \right) \right), \text{ and also} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) &= \int_{E^{ny}} {}^{0,p}(\alpha(y_n - g))f(y_n / \bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})dy_n = {}^{0,p} \left( \alpha \left( N_{c,0} + {}^{0,q}(N_{c,1}u_n) + {}^{0,2q}(N_{c,2}u_n^2) - g \right) \right) = \\ &= {}^{0,p}(\alpha(N_{c,0} - g)) + {}^{0,q}({}^{0,p}(\alpha N_{c,1})u_n) + {}^{0,2q}({}^{0,p}(\alpha N_{c,2})u_n^2), \end{aligned}$$

where  $N_{c,0} = N_{c,0}$ ,  $N_{c,1} = (N_{c,1})^{H_{p+q,q}}$ ,  $N_{c,2} = (N_{c,2})^{H_{p+2q,2q}}$ . Hence (Appendix)

$$u_n^* = \arg \min_{u_n} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = -\frac{1}{2} {}^{0,q} \left( {}^{0,q}M_{c,2}^{-1}M_{c,1} \right), \quad (27)$$

where  $M_{c,1} = {}^{0,p}(\alpha N_{c,1})$ ,  $M_{c,2} = {}^{0,p}(\alpha N_{c,2})$ . The formula (27) is the optimal control action at the last  $n$ -th instant of time.

The minimal value of the function  $\varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1})$  is (Appendix):

$$\varphi_n(u_n^*, \bar{u}_{n-1}, \bar{y}_{n-1}) = \min_{u_n \in \mathbb{U}} \varphi_n(\bar{u}_n, \bar{y}_{n-1}) = M_{c,0} - \frac{1}{4} {}^{0,q} \left( M_{c,1} {}^{0,q} \left( {}^{0,q}M_{c,2}^{-1}M_{c,1} \right) \right),$$

where  $M_{c,0} = {}^{0,p}(\alpha(N_{c,0} - g))$ .

The search of the optimal control action  $u_{n-1}^*$  at the penultimate  $(n-1)$ -th instant of time seems unfeasible. The control action  $u_n^*$  (27), obtained at the last instant of time, can be used at any instant of time  $s$ .

### Computer simulation

The algorithms of the optimal dual control with passive information storage (22), (27) were realized programmatically, utilized at a number of objects and showed results acceptable for practice. For instant, the object with Booth function as the regression function was simulated:

$$y = (x_1 + 2x_2 - 7)^2 + (2x_1 + x_2 - 5)^2. \quad (28)$$

This function has minimum at the point  $(x_1, x_2) = (1, 3)$ . The following priory characteristics of the coefficients of the approximating polynomial (8) was used: the priory mathematical expectations

$$v_{c_0} = 50, v_{c_1} = (-20 \quad -25), v_{c_2} = \begin{pmatrix} 9 & 5 \\ 5 & 9 \end{pmatrix}$$

and the priory variance-covariance matrices

$$d_{c,0,0} = 1, d_{c,1,1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, d_{c,2,2} = 0.5 \cdot \begin{pmatrix} \hat{1}_{1,1,1,1} & \hat{0}_{1,1,2,1} & \hat{0}_{1,1,1,2} & \hat{0}_{1,1,2,2} \\ \hat{0}_{2,1,1,1} & \hat{1}_{2,1,2,1} & \hat{0}_{2,1,1,2} & \hat{0}_{2,1,2,2} \\ \hat{0}_{1,2,1,1} & \hat{0}_{1,2,2,1} & \hat{1}_{1,2,1,2} & \hat{0}_{1,2,2,2} \\ \hat{0}_{2,2,1,1} & \hat{0}_{2,2,2,1} & \hat{0}_{2,2,1,2} & \hat{1}_{2,2,2,2} \end{pmatrix}.$$

The four-dimensional matrix  $d_{c,2,2}$  is presented by an associated with it two-dimensional matrix. The covariance matrices  $d_{c,0,1}, d_{c,1,0}, d_{c,0,2}, d_{c,2,0}, d_{c,1,2}$  and  $d_{c,2,1}$  are taken as zero matrices of the appropriate sizes.

The sequence of the control actions is showed in a figure for some variant of the simulation.

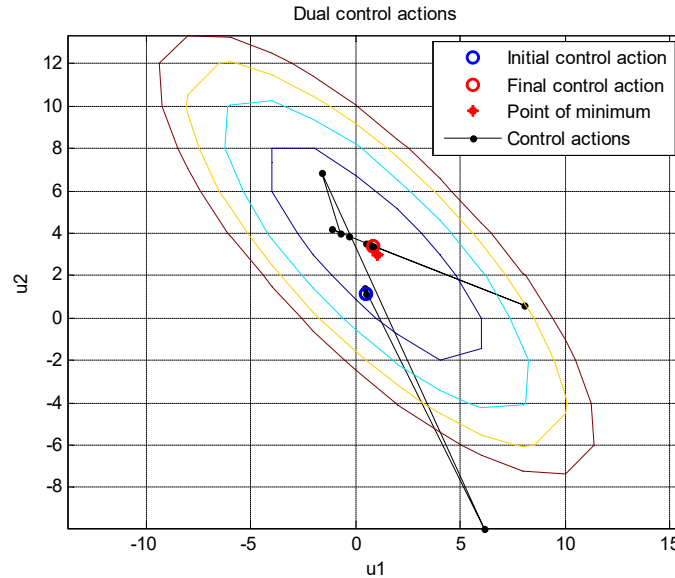


Fig. 1. The dual control actions for the example

One can see in the figure that the point of the extremum of the regression function (28) is reached.

### Conclusion

To sum up, the general solution to the problem of the dual control with passive information storage of the extremal multidimensional regression object in the Gaussian case was obtained for the first time. This solution can be applied to control various technological processes, but each of them requires separate consideration. One of them is the allowance distribution problem [8].

### Appendix

Let  $x = (x_{j_{(q)}})$ ,  $J_{(q)} = (j_1, j_2, \dots, j_q)$ , be a  $q$ -dimensional matrix, that is the argument of a  $p$ -dimensional-matrix function  $y = (y_{i_{(p)}})$ ,  $i_{(p)} = (i_1, i_2, \dots, i_p)$ , and this function has the form

$y = \varphi(x) = c_0 + {}^{0,q} (c_1 x) + {}^{0,2q} (c_2 x^2) = c_{t,0} + {}^{0,q} (x c_{t,1}) + {}^{0,2q} (x^2 c_{t,2})$ , where  $c_k$ ,  $k = 0, 1, 2$ , are the  $(p + kq)$ -dimensional-matrix coefficients of the function  $\varphi(x)$ , and  $c_2$  is symmetric relative its last  $q$ -multi-indexes. Let it be required to find the extremum of this function.

Optimal value of  $x$  can be found from the equation  $\partial \varphi(x) / \partial x = 0$ . Differentiating of  $\varphi(x)$  gives the equation  $\widehat{c}_1 + 2 {}^{0,q} (c_2 x) = 0$ .

Hence  $x_n^* = -\frac{1}{2} {}^{0,q} ({}^{0,q} c_2^{-1} c_1)$ , where  ${}^{0,q} c_2^{-1}$  is the matrix  $(0, q)$ -inverse to the matrix  $c_2$ .

Let us to find the minimum value  $y^* = \varphi(x^*)$  of the function  $\varphi(x)$ .

Since  ${}^{0,2q} (c_2 x^2) = {}^{0,q} ({}^{0,q} (c_2 x) x)$  and the equation  ${}^{0,q} (c_2 x_n^*) = -\frac{1}{2} c_1$  for  $x = x^*$  is fulfilled, we have

$${}^{0,2q}(c_2(x_n^*))^2 = -\frac{1}{2}{}^{0,q}(c_1x_n^*) \text{ and}$$

$$y^* = \varphi(x^*) = c_0 + {}^{0,q}(c_1x^*) + {}^{0,2q}(c_2(x^*)^2) = c_0 + {}^{0,q}(c_1x^*) - \frac{1}{2}{}^{0,q}(c_1x^*) = c_0 + {}^{0,q}(c_1x^*).$$

$$\text{Substituting } x_n^* \text{ into this expression gives } y^* = c_0 - \frac{1}{4}{}^{0,q}(c_1{}^{0,q}({}^{0,q}c_2^{-1}c_1)).$$

### References

1. Mukha V.S., Kako N.F. Dual Control of Multidimensional-matrix Stochastic Objects. *Information Technologies and Systems 2019 (ITS 2019): Proceeding of the International Conference*, BSUIR, Minsk, 30th October 2019. Minsk: BSUIR; 2019: 236-237.
2. Feldbaum A.A. *Fundamentals of the theory of the optimal automatic systems*. Moscow: Nauka; 1963. (In Russ.)
3. Feldbaum A.A. Optimal Control Systems. *Mathematics in Science and Engineering. A series of monographs and textbooks*. Vol. 22. Academic Press, New York and London; 1965.
4. Mukha V.S. On the dual control of the inertialess objects. *Proceedings of the LETI*. 1973;130:31-37. (In Russ.)
5. Mukha V.S., Sergeev E.V. Dual control of the regression objects. *Proceedings of the LETI*. 1976;202:58-64. (In Russ.)
6. Mukha V.S. *Analysis of multidimensional data*. Minsk: Technoprint; 2004. (In Russ.)
7. Mukha V. S., Kako N. F. Total probability and Bayes formulae for joint multidimensional-matrix Gaussian distributions. *Vestsi Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*. 2022;58(1):48-59. DOI: 10.29235/1561-2430-2022-58-1-48-59.
8. Mukha V.S., Kako N.F. Flat Problem of Allowance Distribution as Dual Control Problem. *Information Technologies and Systems 2020 (ITS 2020): Proceeding of the International Conference*. BSUIR, Minsk, Belarus, 18th November 2020. Minsk: BSUIR; 2020: 195-196.

### Authors' contribution

Mukha V.S. developed and wrote the article.

Kako N.F. was directly involved in developing and writing the article.

### Information about the authors

**Mukha V.S.** – Dr. of Sci., Professor, Professor at the Department of Information Technologies of Automated Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Kako N.F.** – Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375 44 781-16-51;  
e-mail: mukha@bsuir.by  
Mukha Vladimir Stepanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-31-39>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.42:669

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАРТ РАСКРОЯ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА

А.И. ЯКИМОВ, Д.А. ДЕНИСЕВИЧ, Е.А. ЯКИМОВ

*Белорусско-Российский университет (г. Могилев, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 18 марта 2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Статья посвящена проектированию и применению программного приложения для автоматического формирования схемы расположения изделий и расчета критерия «бесполезный материал» при раскрое листовых материалов. Описана функциональная модель производства по изготовлению продукции, раскраиваемой из листового материала, позволяющая определить место разработанного приложения в производственном процессе. В приложении реализованы детерминированные алгоритмы и эволюционный (генетический) алгоритм раскроя. Представлены результаты исследования алгоритмов формирования карт раскроя по времени нахождения решения и критерию «бесполезный материал». Созданное приложение позволяет находить общую площадь изделий, свободную площадь как разницу между площадью листового материала и общей площадью изделий. Программное приложение написано на языке JavaScript с применением библиотеки React.

**Ключевые слова:** рациональный раскрой материала, критерий «бесполезный материал», приложение для проектирования карт раскроя.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Якимов А.И., Денисевич Д.А., Якимов Е.А. Автоматизация проектирования карт раскроя листовых материалов в условиях производства. *Доклады БГУИР*. 2022; 20(5): 31-39.

## DESIGN AUTOMATION OF SHEET MATERIALS CUTTING MAPS IN A PRODUCTION

ANATOLY I. YAKIMOV, DMITRY A. DENISEVICH, EUGENE A. YAKIMOV

*Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus)*

*Submitted 18 March 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The article is devoted to the design and use of a software application for the automatic formation of the products layout and the calculation of the criterion "useless material" when cutting sheet materials.

A functional model of production for the manufacture of products cut from sheet material is described. This model allows determining the place of the developed application in the production process. The application implements deterministic algorithms and an evolutionary (genetic) cutting algorithm. The results of the study of algorithms for the cutting maps formation according to the time of finding a solution and the criterion of “useless material” are presented. Developed application allows you to find the total area of products, the free area as the difference between the area of sheet material and the total area of products. The software application is written in JavaScript using the React library.

**Keywords:** rational material cutting, “useless material” criterion, application for designing cutting maps.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Yakimov A.I., Denisevich D.A., Yakimov E.A. Design Automation of Sheet Materials Cutting Maps in a Production. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 31-39.

## Введение

На многих промышленных предприятиях раскрой материалов является важным этапом в производственном процессе выпуска готовой продукции. Для количественной оценки качества проектируемых карт раскроя принимаются различные критерии, на основании которых проводится анализ эффективности выбранного алгоритма для построения схемы расположения изделий на листовом материале.

Схема расположения раскраиваемых изделий может применяться в производстве строительных материалов, выпуске потребительских товаров, в отрасли машиностроения и др. В производственном процессе используется инженерами на раскройном участке или загружается в автоматизированном режиме в программу управления оборудованием для раскроя изделий [1].

В производстве могут одновременно выполняться несколько заказов с разными условиями поставки продукции, при этом важно вести оперативный учет изготавливаемых изделий, обеспечивающих своевременное выполнение заказов.

Для оптимизации хода производственного процесса важно располагать оперативной информацией о состоянии готовности изделий для выполнения заказов, степени реализации последующих заказов, загруженности оборудования.

Оптимизация раскройного производства осуществляется в первую очередь для сокращения общих затрат, что в конечном итоге приводит к снижению себестоимости готовой продукции. В рассматриваемом случае производственный процесс выпуска готовых изделий направлен на получение максимальной прибыли.

Поставленная цель достигается применением комплексного подхода к производству готовых изделий, а также благодаря использованию разработанного программного приложения для проектирования карт раскроя и применению их на раскройном участке [2]. Приложение реализовано на языке JavaScript с применением библиотеки React, осуществляя взаимодействие пользователей через браузер.

## Функциональная модель производства

Для решения задачи комплексного подхода к автоматизации производства готовых изделий и определению места программных средств оптимизации раскройного участка построена функциональная модель (рис. 1) производства по методологии IDEF0 [3].





Рис. 1. Функциональная модель производства  
Fig. 1. Functional production model

Для описания функциональной модели производства используются переменные:  
 $\{PR_i\}$  – множество заказов на поставку продукции (см. рис. 1);  
 $(IS)_t$  – отчет о заказах за период  $t$ ;  
 $\{RV_{ij}\}$  – матрица потребностей в  $i$ -м ресурсе в  $j$ -м интервале планирования для выполнения плана-графика производства продукции;  
 $[PS_{ij}]$  – матрица изготовленной продукции  $i$ -го вида в  $j$ -м периоде;  
 $[O_{ijk}]$  – матрица продукции  $i$ -го вида в  $j$ -м интервале планирования по  $k$ -му заказу;  
 $\{RV_{ij}\}$  – матрица потребностей в  $i$ -м ресурсе в  $j$ -м интервале планирования для выполнения плана-графика производства листового материала;  
 $[PI_{jk}], [PO_{jk}]$  – матрицы выполненных и невыполненных требований по изготовлению продукции в  $j$ -м интервале планирования по  $k$ -му заказу;  
 $[RD_{ijk}]$  – матрица объема  $i$ -го вида ресурса в  $j$ -м интервале планирования по  $k$ -му заказу;  
 $[RS_{ij}]$  – матрица объема листового материала  $i$ -го вида в  $j$ -м периоде;  
 $[SD_{ij}]$  – матрица объема изготовления  $i$ -го вида материала в  $j$ -м интервале планирования;  
 $[IO_{ijk}]$  – матрица объема продукции  $i$ -го вида в  $j$ -м интервале планирования по  $k$ -му заказу;  
 $SmartOpt$  – приложение, проектирующее карты раскроя согласно плану выполнения заказов на изготовление продукции;  
 $[RDB_{ijk}]$  – матрица заказов  $i$ -го вида в  $j$ -м интервале планирования по  $k$ -му заказу;  
 $CC_i$  – карта раскроя, показывающая расположение изделий в соответствии с  $i$ -м заказом на листовом материале.

В процессе «Учет заказов» сотрудниками принимаются заказы  $\{PR_i\}$ , оформляется документация, обсуждаются сроки выполнения работ. Выходными данными процесса являются отчет по заказам  $(IS)_t$  и информация о текущем выполнении заказов  $[PI_{jk}], [PO_{jk}]$ . На основании входных и выходных данных формируется портфель заказов, создаются отчеты по выполненным заказам  $(IS)$  за период времени  $t$ .

Процесс «Планирование» реализуется на основании заказов  $\{PR_i\}$  и данных заказов  $[PI_{jk}], [PO_{jk}]$ . Выходными данными бизнес-процесса являются план выполнения заказов  $[RD_{ijk}]$  и план-график производства листовых материалов  $[SD_{ij}]$ . В результате выходные данные поступают на следующий процесс «Производство листового материала» для согласования изготовления продукции  $[O_{ijk}]$  определенного вида согласно отчетам по заказам  $(IS)_t$ .

В процессе «Производство листового материала» входными данными являются ресурсы  $\{RV_{ij}\}$ . Процесс регламентируется с помощью плана графика производства листовых материалов  $[RV_{ij}]$ . Выходными данными является листовой материал  $[RS_{ij}]$ , вид которого определен согласно плану-графику  $[RV_{ij}]$  производства.

В процессе «Проектирование карты раскроя» на вход поступает листовой материал  $[RS_{ij}]$ . На выходе процесса формируется карта раскроя  $CC_i$ , построенная на основе плана выполнения заказов  $[SD_{ij}]$  с использованием приложения для проектирования карт раскроя  $SmartOpt$ .

В процессе «Раскрой материала» в качестве входных данных выступает карта раскроя  $CC_i$ . Выходным результатом является продукция  $[O_{ijk}]$ , изготовленная согласно сформированного плана в  $j$ -м интервале планирования по  $k$ -му заказу.

### Основные функциональные возможности приложения

Для реализации процесса «Проектирование карты раскроя» (см. рис. 1) разработано приложение  $SmartOpt$  со следующими функциональными возможностями:

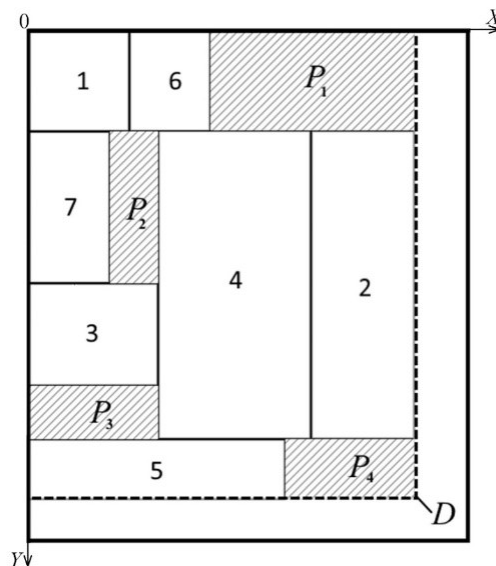
- проектирует карты раскроя по заданным исходным данным согласно выбранному алгоритму для построения;
- производит расчеты площади листового материала, общей площади изделий, свободной площади как разницу между площадью листового материала и общей площадью изделий;
- определяет время работы алгоритма для построения карты раскроя, рассчитывает значение критерия  $P$  – «бесполезный материал».

Пусть  $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n \mid n = |N|\}$  – изделия шириной  $W_i$ , длиной  $L_i$ , площадью  $s_i = W_i \cdot L_i$ , которые изготавливаются из листового материала прямоугольной формы площадью  $S$ , где  $0 < s_i \leq S$ ,  $i = 1, \dots, |N|$ .

Ограничение:

$$\sum_{i=1}^{|N|} s_i \cdot x_i \leq D, i = 1, \dots, |N|, \quad (1)$$

где  $D$  – построенный прямоугольник со сторонами, проходящими через начало координат, и стороны прямоугольных изделий по оси  $X$  и  $Y$  (рис. 2);  $x_i$  – количество изделий  $i$ -го типа.



$P_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) – «бесполезный материал»;  $D$  – прямоугольник относительно начала координат и изделий

**Рис. 2.** Спроектированная карта раскроя  
**Fig. 2.** Designed cutting map

Тогда критерий «бесполезный материал»  $P$  вычисляется по формуле

$$P = (D - \sum_{i=1}^{|N|} s_i \cdot x_i) \rightarrow \min, i = 1, \dots, |N|. \quad (2)$$

Алгоритм определения значения критерия  $P$  – «бесполезный материал»:

- построить карту раскроя (пример карты раскроя см. рис. 2);
- найти изделие на карте раскроя со стороной, проецируемой на ось  $X$ , с наибольшим значением (см. изделие 2 на рис. 2);
- найти изделие на карте раскроя со стороной, проецируемой на ось  $Y$ , с наибольшим значением (см. изделие 5 на рис. 2);
- построить прямоугольник  $D$  (см. рис. 2) со сторонами, проходящими через начало координат и стороны найденных прямоугольных изделий, проецируемые на оси  $X$  и  $Y$ , с наибольшими значениями;
- найти разность между площадью построенного прямоугольника  $D$  и суммой площадей всех изделий (см. пример на рис. 2):  $P = D - \sum_{i=1}^7 s_i x_i$  или в соответствии с рис. 2

$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$ . Полученный результат является искомым значением критерия  $P$  – «бесполезный материал» [4, 5].

### Алгоритмы проектирования карт раскроя в приложении

*Алгоритм «Первый подходящий».* В соответствии с алгоритмом «Первый подходящий» первое изделие добавляют на листовой материал, начиная с левого верхнего угла (например, изделие 1 на рис. 2). На шаге  $k$  пытаются добавить изделие  $N_i$  в листовой материал справа от  $N_{i-1}$  изделия. Если изделие размещается по ширине листа, то его добавляют, иначе – пытаются добавить по длине листа, начиная от верхнего левого угла листового материала и нижней стороны изделия  $N_{i-1}$ . Если же изделие не помещается по ширине и по длине листового материала, его добавляют в список  $I$  неподходящих изделий [4].

*Алгоритм «Первый подходящий с упорядочиванием».* По алгоритму «Первый подходящий с упорядочиванием» изделия сортируются по убыванию их площади. Шаги решения задачи совпадают с выполнением алгоритма «Первый подходящий». Добавление изделий в карту раскроя происходит начиная с самого большого изделия по площади.

*Генетический алгоритм* строится на основании эволюции в природе, ориентируется на использование случайного расположения генов в хромосоме, тем самым создается произвольная популяция [6, 7]. Рассмотрим применение генетического алгоритма для решения задачи проектирования карты раскроя (табл. 1).

Пусть  $K = \{K_1, K_2, \dots, K_k \mid k = |K|\}$  – популяция для нахождения решения, состоящая из хромосом. Хромосома состоит из генов и строится на основании пары изделий и операторов  $H$  или  $V$ , которые определяют расположение двух изделий (нескольких пар изделий), стоящих перед оператором, по горизонтали или вертикали [8]. Например, лучшим решением в популяции выбрана хромосома  $K_i = \langle 1 \ 6 \ H \ 7 \ 3 \ V \ 4 \ H \ 2 \ H \ 5 \ V \ V \rangle$ , тогда интерпретацией является получение фенотипа из генотипа, т. е. определение из действующей хромосомы расположения всех изделий на листовом материале (см. табл. 1).

Декодирование хромосомы в приложении *SmartOpt* реализовано посредством стека.

Шаг 1. Выбирается первый ген в хромосоме  $K_i$ , номера изделий и оператор которого записываются в стек.

Шаг 2. Осуществляется чтение двух последних элементов стека, которые удаляются из него и объединяются в один элемент, располагаясь согласно указанному оператору (по горизонтали  $H$  или по вертикали  $V$ ). В табл. 1 изделия 1 и 6 располагаются по горизонтали.

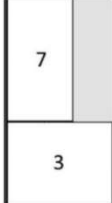
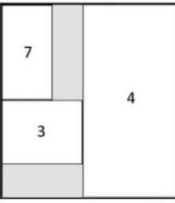
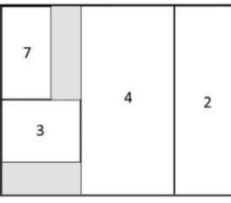
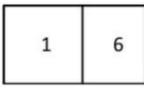
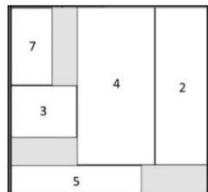
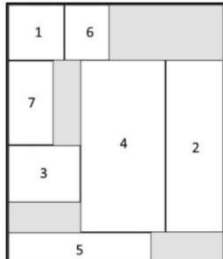
Шаг 3. Объединенная часть, состоящая только из номеров изделий, записывается в стек.

Шаг 4. Из хромосомы выбирается следующий ген, номера изделий и оператор которого записываются в стек.

Шаг 5. Возврат к шагу 2, пока в стеке не окажется один элемент.

Шаг 6. Последний элемент, оставшийся в стеке, соответствует проектируемой карте раскроя. В табл. 1 на карте раскроя расположены изделия 1, 6, 7, 3, 4, 2, 5.

**Таблица 1.** Интерпретация хромосомы «1 6 H 7 3 V 4 H 2 H 5 V V»  
**Table 1.** The interpretation of the chromosome “1 6 H 7 3 V 4 H 2 H 5 V V”

		Гены Genes			
Номера изделий Product number		3	4	2	
	6	7	7,3	7,3,4	
	1	1,6	1,6	1,6	
Оператор Operator		H	V	H	
Фенотип Phenotype					
					
		Гены Genes			
Номера изделий Product number		5			
		7,3,4,2	7,3,4,2,5		
		1,6	1,6	1,6,7,3,4,2,5	
Оператор Operator		V	V		
Фенотип Phenotype					

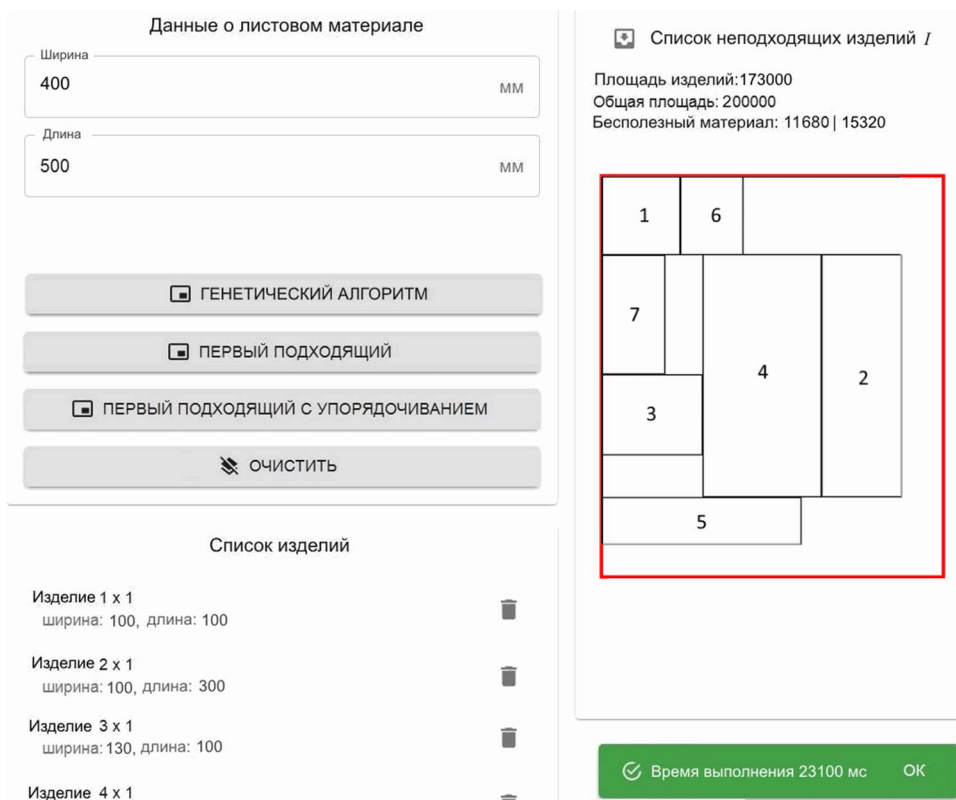
### Тестирование и результаты

Приложение *SmartOpt* реализует три алгоритма, по которым выполняется поиск лучшего решения раскроя листового материала, рассчитывается критерий «бесполезный материал» и определяется время работы алгоритмов. Преимущества приложения (рис. 3), реализованного через браузер, определяются доступом из любых устройств с поддержкой сети Интернет и простотой разработки интерфейса с использованием библиотеки React [9], где не требуется обновление всей страницы при любых действиях пользователя.

Для исследования алгоритмов раскроя с заданными параметрами изделий и листового материала имеется возможность очистки предыдущей карты раскроя без обновления страницы приложения в веб-обозревателе. Метод «Очистить» удаляет карту раскроя, сохраняя список изделий с требуемыми параметрами (см. рис. 3).

В левой части рабочего окна (см. рис. 3) в полях ввода параметров положительными целыми числами задаются размеры листового материала, а также ширина, длина и количество изделий. Карты раскроя формируются по трем алгоритмам, позволяя пользователю выбирать лучшее решение. Анализ алгоритмов раскроя можно провести по критерию ( $P$ ,  $m^2$ ) «бесполезный материал» и времени ( $T$ , с) решения задачи.

Для тестирования приложения и исследования алгоритмов принят листовый материал площадью  $S = 10,0 m^2$ . Изделия представлены двумя группами. В первой группе Тест 1 изделия имеют размеры, отличающиеся между собой не более чем в 1,5 раза. В группе Тест 2 количество изделий почти в два раза превышает количество изделий группы Тест 1. Размеры изделий группы Тест 2 также различаются между собой более чем в два раза (табл. 2). Результаты тестирования представлены в табл. 3.



**Рис. 3.** Рабочая область приложения по формированию карт раскроя  
**Fig. 3.** The workspace of the application for the formation of cutting maps

**Таблица 2.** Исходные данные для тестирования  
**Table 2.** Initial data for testing

Тест 1 Test 1				Тест 2 Test 2			
№ изделия (кол-во) № item (number)	$W_i$ , м $W_i$ , m	$L_i$ , м $L_i$ , m	$s_i$ , м <sup>2</sup> $s_i$ , m <sup>2</sup>	№ изделия (кол-во) № item (number)	$W_i$ , м $W_i$ , m	$L_i$ , м $L_i$ , m	$s_i$ , м <sup>2</sup> $s_i$ , m <sup>2</sup>
1–2 (2)	1,0	1,5	1,5	1–5 (5)	0,4	0,5	0,2
3 (1)	0,7	1,5	1,05	6–10 (5)	0,4	0,5	0,2
4 (1)	0,8	1,5	1,2	11–12 (2)	1,0	1,0	1,0
5 (1)	1,2	1,0	1,2	13 (1)	1,5	0,7	1,05
6 (1)	0,8	1,0	0,8	14 (1)	1,0	1,3	1,3
7 (1)	1,0	1,0	1,0	15 (1)	0,7	1,3	0,91

**Таблица 3.** Результаты тестирования  
**Table 3.** Test results

Алгоритм Algorithm	Тест 1 Test 1		Тест 2 Test 2	
	$T$ , с $T$ , s	$P$ , м <sup>2</sup> $P$ , m <sup>2</sup>	$T$ , с $T$ , s	$P$ , м <sup>2</sup> $P$ , m <sup>2</sup>
Первый подходящий The first suitable	0,006	1,75	0,006	0,74
Первый подходящий с упорядочиванием The first suitable with ordering	0,006	1,75	0,006	1,74
Генетический алгоритм Genetic algorithm	7,99	1,12	76,072	1,44

Полученные результаты (см. табл. 3) позволяют оценить работу алгоритмов при различных условиях размещения изделий на листовом материале.

## Обсуждение результатов

В первом тестировании алгоритмы «Первый подходящий» и «Первый подходящий с упорядочиванием» расположили изделия на листовом материале за одинаковое время  $T = 0,006$  с. Суммарная площадь изделий составляет  $8,25$  м<sup>2</sup>. При этом площадь прямоугольника  $D$  (см. рис. 2) совпадает с площадью  $S$  листового материала, так как критерий  $P = 1,75$  м<sup>2</sup>.

Генетический алгоритм раскладывает изделия более плотно ( $P = 1,12$  м<sup>2</sup>) и  $D < S$ , однако значительно уступает по времени ( $T = 7,99$  с). Таким образом, в первом тестировании ни один из алгоритмов не обладает явными преимуществами по сравнению с другими.

При втором тестировании значение критерия «бесполезный материал» ( $P = 0,74$  м<sup>2</sup>) алгоритма «Первый подходящий» оказалось наилучшим среди исследуемых алгоритмов. Такой результат объясняется порядком добавления изделий на листовую материал. Алгоритм «Первый подходящий с упорядочиванием» расположил изделия с площадью прямоугольника  $D$ , совпадающей с площадью  $S$  листового материала.

Генетический алгоритм показал значение по критерию «бесполезный материал»  $P = 1,44$  м<sup>2</sup> и на порядок худший результат по времени по сравнению с первым тестированием ( $T = 76,072$  с).

## Заключение

Для автоматизации проектирования карт раскроя в производственном процессе разработано приложение SmartOpt, использующее три алгоритма: «Первый подходящий», «Первый подходящий с упорядочиванием» и «Генетический алгоритм».

Предложен критерий «бесполезный материал» для оценки качества построения карт раскроя приложением SmartOpt тремя алгоритмами. Выполнено тестирование алгоритмов с анализом качества карт раскроя по критерию «бесполезный материал» ( $P$ , м<sup>2</sup>) и оценкой времени ( $T$ , с) построения решения.

Практически обосновывается применение нескольких алгоритмов для решения задачи раскроя листовых материалов в производственном процессе, так как при определенном порядке добавления разных изделий, например, алгоритм «Первый подходящий» показывает лучший результат в сравнении с «Генетическим алгоритмом» по критерию «бесполезный материал».

Разработанное приложение ориентировано для применения на предприятиях по изготовлению продукции, раскраиваемой из листового материала, предназначено для инженеров-проектировщиков, мастеров производственных участков по раскрою листовых материалов.

## Список литературы

1. Petunin A.A., Stylios Ch. Optimization Models of Tool Path Problem for CNC Sheet Metal Cutting Machines. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(12):23-28.
2. Денисевич Д.А. Оптимальный раскрой рулонных материалов при реализации заказов на продукцию. *Автоматизированные технологии и производства*. 2021;23(1):7-10.
3. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования : СТБ 2195-2011. Введ. РБ 01.01.2012. Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации; 2011.
4. Демиденко О.М., Якимов Е.А., Денисевич Д.А. Исследование алгоритмов рационального раскроя листового материала. *Проблемы физики, математики и техники*. 2020;42(1):91-94.
5. Denisevich D.A., Yakimov A.I., Vladova A.Yu. Developing and testing cutting map design of rectangular sheets through the “useless material” criterion. *IFAC-PapersOnLine*. 2021;54(1):472-477.
6. Забелин С.Л., Фроловский В.Д., Жеголко К.В. Разработка и исследование генетического алгоритма для автоматизации проектных процедур оптимизации геометрического покрытия. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2015;21(2):257-265.
7. Фролов В.В. Практические аспекты использования параллельных вычислений в генетическом алгоритме. *Доклады БГУИР*. 2018;115(5):24-30.
8. Ковалевич А.А., Якимов А.И., Албкеират Д.М. Исследование стохастических алгоритмов оптимизации для применения в имитационном моделировании систем. *Информационные технологии*. 2011;8:55-60.

9. Горбачев А.А., Горбачева Е.С. Сравнение классического процесса реализации веб-приложений и подхода с использованием библиотеки React. *Молодой исследователь Дона*. 2020;22(1):28-31.

### References

1. Petunin A.A., Stylios Ch. Optimization Models of Tool Path Problem for CNC Sheet Metal Cutting Machines. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(12):23-28.
2. Denisevich D.A. [Optimal cutting of rolled materials when implementing product orders]. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva=Automation of technologies and production*. 2021;23(1):7-10. (In Russ.)
3. Information technologies for product lifecycle support. Methodology of functional modeling: STB 2195-2011. Introduction RB 01.01.2012. Minsk : Belarus State Institute of Standardization and Certification; 2011. (In Russ.)
4. Demidenko O. M., Yakimov E.A., Denisevich D.A. [The research of rational cutting algorithms of sheet material]. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki = Problems of physics, mathematics and engineering*. 2020;42(1):91-94. (In Russ.)
5. Denisevich D.A., Yakimov A.I., Vladova A.Yu. Developing and testing cutting map design of rectangular sheets through the “useless material” criterion. *IFAC-PapersOnLine*. 2021;54(1):472-477.
6. Zabelin S.L., Frolovskiy V.D., Zhegolko K.V. [Development and investigation of genetic algorithm for project procedures automation of geometrical coverage optimization]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta=Transactions of the Tambov state technical university*. 2015;21(2):257-265. (In Russ.)
7. Frolov V.V. [Practical aspects of using of parallel computing in genetic algorithm]. *Doklady BGUIR=Doklady BGUIR*. 2018;(5):24-30. (In Russ.)
8. Kovalevich A.A., Yakimov A.I., Albkeirat D.M. [Research of stochastic optimization algorithms for application in system simulation]. *Informatsionnyye tekhnologii = Information Technology*. 2011;8:55-60. (In Russ.)
9. Gorbachev A.A., Gorbacheva E.S. [Comparison of the classical web application implementation process and the React library approach]. *Molodoj issledovatel' Dona = Young don researcher*. 2020; 22(1):28-31. (In Russ.)

### Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

### Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

### Сведения об авторах

**Якимов А.И.**, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления Белорусско-Российского университета.

**Денисевич Д.А.**, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления Белорусско-Российского университета.

**Якимов Е.А.**, к.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления Белорусско-Российского университета.

### Information about the authors

**Yakimov A.I.**, Dr. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Automated Control Systems of Belarusian-Russian University.

**Denisevich D.A.**, Senior Lecturer at the Department of Automated Control Systems of Belarusian-Russian University.

**Yakimov E.A.**, Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Automated Control Systems of Belarusian-Russian University.

### Адрес для корреспонденции

212000, Республика Беларусь,  
г. Могилев, пр-т Мира, 43,  
Белорусско-Российский университет;  
тел. +375-22-262-89-70; +375-29-245-60-71;  
e-mail: denis1351@yandex.ru  
Денисевич Дмитрий Александрович

### Address for correspondence

212000, Republic of Belarus,  
Mogilev, Mira Ave., 43,  
Belarusian-Russian University;  
tel. +375 22 2628970; +375-29-245-60-71;  
e-mail: denis1351@yandex.ru  
Denisevich Dmitry Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-40-47>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 544.653.23, 539.232, 535.372

## АНОДНАЯ КОМПОЗИЦИОННАЯ НАНОСТРУКТУРА: ФОРМИРОВАНИЕ, МОРФОЛОГИЯ, ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА

А.В. ГОГА, А.А. ПОЗНЯК, С.М. ЗАВАДСКИЙ, Д.А. ГОЛОСОВ, А.Н. ПЛИГОВКА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 18 марта 2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Двухслойная система Al/Nb (1000/200 нм) на кремниевой подложке была проанодирована в 0,2 М водном растворе щавелевой кислоты при постоянном напряжении 53 В. После завершения этапа анодирования алюминия производили замену электролита на 0,5 М водный раствор борной кислоты и затем реанодировали подслои ниобия до напряжения 400 В. Для создания анодной композиционной наноструктуры проводили удаление большей части анодного оксида алюминия методом химического травления в течение 1200 с в 50 % растворе ортофосфорной кислоты при температуре 50 °С. Исследована морфология, фотолюминесценция, оптическое отражение анодной композиционной наноструктуры. Анодная композиционная наноструктура показала эффективное оптическое отражение в диапазоне длин волн от 540 до 1000 нм, а максимальная отражающая эффективность наблюдалась на длине волны 850 нм и составляет 52 %. Пик фотолюминесценции наблюдался на длине волны 453 нм.

**Ключевые слова:** высокое аспектное соотношение, переизлучение, наноструктурирование, наноматериал, ниобий, оксид ниобия, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NbO<sub>2</sub>, ширина запрещенной зоны.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Авторы признательны Е.Б. Чубенко (НИЛ 4.3 НИЧ БГУИР) за помощь в проведении исследований фотолюминесценции.

**Для цитирования.** Гога А.В., Позняк А.А., Завадский С.М., Голосов Д.А., Плиговка А.Н. Анодная композиционная наноструктура: формирование, морфология, оптические и фотолюминесцентные свойства. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 40-47.



## ANODIC COMPOSITE NANOSTRUCTURE: FORMATION, MORPHOLOGY, OPTICAL AND PHOTOLUMINESCENT PROPERTIES

ALIAKSANDR V. HOHA, ALIAKSANDR A. POZNYAK, SERGEY M. ZAVADSKI,  
DMITRIY A. GOLOSOV, ANDREI N. PLIGOVKA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 18 March 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** Two-layer Al/Nb (1000/200 nm) was deposited by sputtering using a DC magnetron method on Si wafers. The anodizing was in 0.2 M oxalic solution at 53 V, re-anodized in the 0.5 M boric acid in potentiodynamic mode at increase of potential until 400 V. For forming anodic composite nanostructure, the porous anodic aluminum oxide was partially removed in 50 % aqueous solution of phosphoric acid at 50°C for 1200 s. The morphology, photoluminescence, and optical reflection of an anodic composite nanostructure were investigated. The anodic composite nanostructure showed effective optical reflection in the wavelength range from 540 to 1000 nm, and the maximum reflective efficiency was observed at a wavelength of 850 nm, 52 % reflectance occurs. The photoluminescence maximum was observed at a wavelength of 453 nm.

**Keywords:** high aspect ratio, reemission, nanostructuring, nanomaterial, niobium, niobium oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NbO<sub>2</sub>, bandgap.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The authors thank E.Chubenko from the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics for her help with photoluminescence investigations.

**For citation.** Hoha A.V, Poznyak A.A., Zavadski S.M., Golosov D.A., Pligovka A.N. Anodic Composite Nanostructure: Formation, Morphology, Optical and Photoluminescent Properties. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 40-47.

### Введение

Формирование и исследование анодных композиционных наноструктур (АКН) на основе двухслойных систем вентильных металлов открывают широкие перспективы для разработки наноструктурированных материалов с новыми уникальными свойствами [1]. Особенностью таких АКН является то, что составляющие их наноструктурированные оксиды могут обладать не только диэлектрическими, но и полупроводниковыми свойствами. Кроме того, они представляют собой системы с периодическим изменяющимся показателем преломления [2], благодаря чему перспективны для применения в нанооптике, нанофотонике, микро- и наноэлектронике. Примером таких оксидов могут служить ZnO [3], TiO<sub>2</sub> [4], WO<sub>3</sub> [5].

Среди полупроводниковых оксидов можно выделить оксид ниобия, который обладает электрохромными свойствами [6], чувствительностью к различным газам [7], а также находит применение в перовскитных солнечных элементах [8]. Основными преимуществами данного материала является его химическая инертность и термическая стабильность. Актуальным остается вопрос улучшения морфологических характеристик наноструктурированного оксида ниобия, например, повышение устойчивости столбиков оксида ниобия при их высоком аспектном отношении. Одним из решений данного вопроса может быть создание АКН на основе массива наностолбиков оксида ниобия и матрицы анодного оксида алюминия (АОА) путем комбинирования приемов анодного оксидирования и химического травления. Подобная методика, помимо улучшения морфологических свойств материала, может придать ему ранее неизученные или нехарактерные для чистого анодного оксида ниобия свойства, а также значительно повлиять на оптические характеристики. На основе аналогичного АКН уже созданы перспективные газочувствительные датчики [7, 9], а также существуют перспективы

изготовления полупроводниковых приборов [10]. Исследование оптических и морфологических свойств АКН оксида ниобия и оксида алюминия представляет особую важность, так как позволяет расширить диапазон возможностей приборного применения данного материала. Было установлено [11, 12], что наноструктурированный оксид ниобия в ряде случаев обладает фотолюминесцентными свойствами. В работе [11], посвященной исследованию наноиголок оксида ниобия, были получены значения длин волн, на которых наблюдался пик интенсивности излучения, равные 407 и 496 нм, с шириной запрещенной зоны (ШЗЗ) 3,15 эВ. В работе [12] установлено, что максимум излучения наноиголок оксида ниобия при температуре 9 К соответствовал 490 нм, а при повышении температуры до комнатной преобладающим стал пик на длине волны 456 нм при ШЗЗ 3,3 эВ. Однако в случае АКН на основе оксидов ниобия и алюминия вклад в фотолюминесценцию наноструктуры может вносить не только оксид ниобия, но и оксид алюминия. Исследована фотолюминесценция пористой матрицы АОА, сформированной в водном растворе ортофосфорной кислоты, максимум ее фотолюминесценции наблюдается на длине волны 415 нм [13]. Также показана фотолюминесценция для АОА, сформированного в водном растворе щавелевой кислоты. Максимум фотолюминесценции приходится на диапазон длин волн 470–480 нм [14]. Следовательно, общая фотолюминесценция АКН может быть обусловлена как сочетанием фотолюминесцентных свойств каждого из компонентов, входящих в АКН, так и представлена фотолюминесценцией одного из входящих в состав компонентов АКН. На основании вышесказанного исследование фотолюминесцентных свойств АКН на основе массива наностолбиков оксида ниобия и матрицы оксида алюминия, его оптических и морфологических особенностей является актуальной задачей.

В данной работе была сформирована АКН методом электрохимического анодирования и химического травления двухслойной системы Al/Nb, а также проведено исследование фотолюминесценции, оптического отражения и морфологии АКН.

### Методика проведения эксперимента

Для формирования АКН на кремниевые пластины методом магнетронного распыления наносили двухслойные системы Al/Nb с толщинами слоев алюминия и ниобия 1000 нм и 200 нм соответственно. Электрохимическое формирование АКН проводили в вертикальной политетрафторэтиленовой двухэлектродной электрохимической ячейке; данная ячейка обеспечивает анодирование двухслойной системы Al/Nb без доступа электролита к кремниевой подложке. Для проведения эксперимента использовали источник токов и напряжений KEYSIGHT N5752A и мультиметр KEYSIGHT 34470A. Электрохимическое анодирование верхнего слоя алюминия проводили в 0,2 М водном растворе щавелевой кислоты при постоянном напряжении 53 В со скоростью развертки напряжения 1 В/с. После завершения этапа анодирования алюминия производили замену электролита на 0,5 М водный раствор борной кислоты и затем реанодировали подслоя ниобия до напряжения 400 В. Для создания АКН проводили удаление большей части АОА методом химического травления в течение 1200 с в 50 % растворе ортофосфорной кислоты при температуре 50 °С.

Морфология образцов с АКН была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при помощи электронного микроскопа Hitachi S 4800. Исследование фотолюминесценции проводили на лазерном спектрометрическом комплексе на основе монохроматора SOLAR MS 7504i. Детектор представляет собой цифровую камеру Proscan HS 101H с кремниевой ПЗС матрицей. Источником света была ксеноновая лампа с максимальной мощностью 1 кВт. Монохроматические линии из спектра лампы выделяли при помощи двойного монохроматора SOLAR DM 160. Измерение спектра возбуждения фотолюминесценции и спектра фотолюминесценции проводили при температуре 20 °С. Фактическая мощность ксеноновой лампы составляла 450 Вт. Ширина входной щели монохроматора MS 7504i составляла 100 мкм при выдержке 20 с и температуре детектора 0 °С. Длина волны детектирования возбуждения фотолюминесценции составляла 450 нм при ширине спектральной полосы детектирования 0,49 нм. Измерение фотолюминесценции проводилось при длине волны возбуждения 340 нм. Оптические характеристики были измерены при помощи спектрофотометра MC 121. Сканирование поверхности экспериментального образца

осуществлялось в диапазоне длин волн от 190 до 1100 нм с шагом 2 нм, угол падения и регистрации составлял  $10^\circ$  по отношению к нормали к поверхности.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены СЭМ изображения поверхности и скола сформированных АКН на кремниевых пластинах. Из рис. 1, *a* видно, что на всей поверхности достаточно равномерно расположены столбики оксида ниобия, однако на поверхности присутствуют дефектные области, что предположительно может быть связано с дефектами исходных металлических пленок, полученных при магнетронном распылении.

Данные дефекты, по всей вероятности, могут оказывать определенное влияние на оптические и фотолюминесцентные характеристики АКН. При рассмотрении поверхности с большим увеличением (рис. 1, *b*) и поперченного скола заметно, что столбики окружает тонкий слой матрицы АОО, которая поддерживает их в вертикальном положении. На рис. 1, *c*, где представлено СЭМ изображение поперченного скола экспериментального образца, четко отображена композиция АКН, снизу вверх: кремниевая пластина – металлический ниобий – сплошной слой оксида ниобия – столбики оксида ниобия в поддерживающей тонкой матрице АОО. Высота столбиков составила 700 нм, а диаметр – около 70 нм, расстояние между центрами столбиков 125 нм, высота, на которую столбики выступают из АОО, составила 303 нм, толщина оставшегося слоя АОО составляет, таким образом, 205 нм.

Анализ СЭМ изображений позволяет сделать вывод о высокой степени упорядоченности и воспроизводимости формы и размеров наностолбиков оксида ниобия. Кроме того, на рис. 1, *c* хорошо заметно, что АОО четко выполняет свою функцию поддержания столбиков в вертикальном положении, и в случае его отсутствия наностолбики образовали бы пучки, опираясь друг на друга [10]. Также следует отметить, что подбор режимов травления позволил оптимизировать количество остаточного АОО в поддерживающем слое, с одной стороны, минимизировав его, что должно положительно сказаться на электрических и фотолюминесцентных характеристиках АКН. Помимо этого, минимизация АОО позволяет использовать большую часть всей удельной площади развитой поверхности оксида ниобия. В то же время оставшийся АОО продолжает успешно выполнять функцию механической стабилизации морфологии АКН.

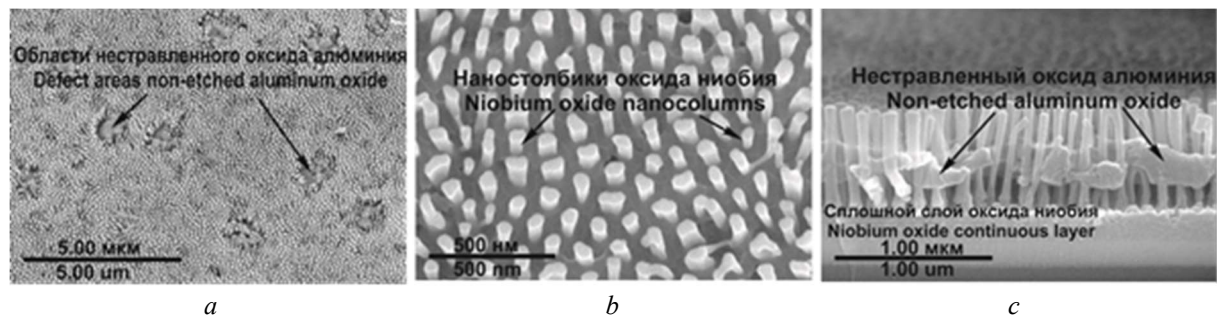


Рис. 1. Сканирующие электронные изображения поверхности (*a*, *b*) и скола (*c*) анодной композиционной наноструктуры

Fig. 1. Scanning electron images of surface (*a*, *b*) and cross-section (*c*) of anodic composite nanostructure

Спектры возбуждения (excitation) и излучения (emission) фотолюминесценции изображены на рис. 2, *a*. Возбуждение фотолюминесценции АКН начинается примерно при длине волны 320 нм с дальнейшим резким ростом интенсивности до 710 отн. ед. и последующим снижением до 350 отн. ед. Четкий пик возбуждения отмечается на длине волны 367 нм. Оценка и расчет энергии межзонных переходов АКН на основе спектра возбуждения фотолюминесценции осуществлялись по соотношению

$$E_{ph} = 1240 \cdot \lambda^{-1}, \quad (1)$$

где  $E_{ph}$  – энергия фотона, эВ,  $\lambda$  – длина световой волны, нм.

По результатам расчетов энергия поглощенных фотонов возбуждения фотолюминесценции АКН составила 3,38 эВ.

На рис. 2, *a* представлен спектр излучения фотолюминесценции АКН. Из рис. 2, *a* видно, что фотолюминесценция начинается при длине волны около 370 нм и высвечивается до 685 нм, после чего снижается до своего минимума на длине волны около 660 нм. Максимум излучения приходится на длину волны 453 нм, где энергия фотона в соответствии с соотношением (1) составляет 2,8 эВ. Однако проведенные исследования фотолюминесценции наностолбиков оксида ниобия, не модифицированных оксидом алюминия, сформированных по той же методике, с теми же морфологическими параметрами, что и наностолбики в АКН, не выявили фотолюминесцентных свойств анодного оксида ниобия. Это доказывает предположение о том, что фотолюминесценция АКН обусловлена присутствием анодного оксида алюминия в ее составе. Согласно проведенным ранее исследованиям, фотолюминесценция АОА с максимумом на длинах волн 470–480 нм, сформированного в водном растворе щавелевой кислоты, может быть обусловлена оксалат-анионами [14], однако, в данной работе пик фотолюминесценции АОА наблюдается на длине волны 470 нм. Сдвиг максимума фотолюминесценции в нашем случае может быть обусловлен другой концентрацией электролита, толщиной оксидного слоя, а также наноструктурированием. Представленный на рис. 2, *a* спектр излучения достаточно растянут с 375 до 670 нм, что предположительно можно обосновать неоднородным составом исследуемой АКН, состоящей из оксида алюминия и оксида ниобия, а также его субоксидов [15].

На рис. 2, *b* изображен спектр оптического отражения АКН. Оптическое поглощение присутствует в ультрафиолетовом диапазоне, так как энергия фотонов на этом промежутке соответствует ШЗЗ обоих компонентов композитного материала, и почти все оптическое излучение в этом диапазоне поглощается экспериментальным образцом.

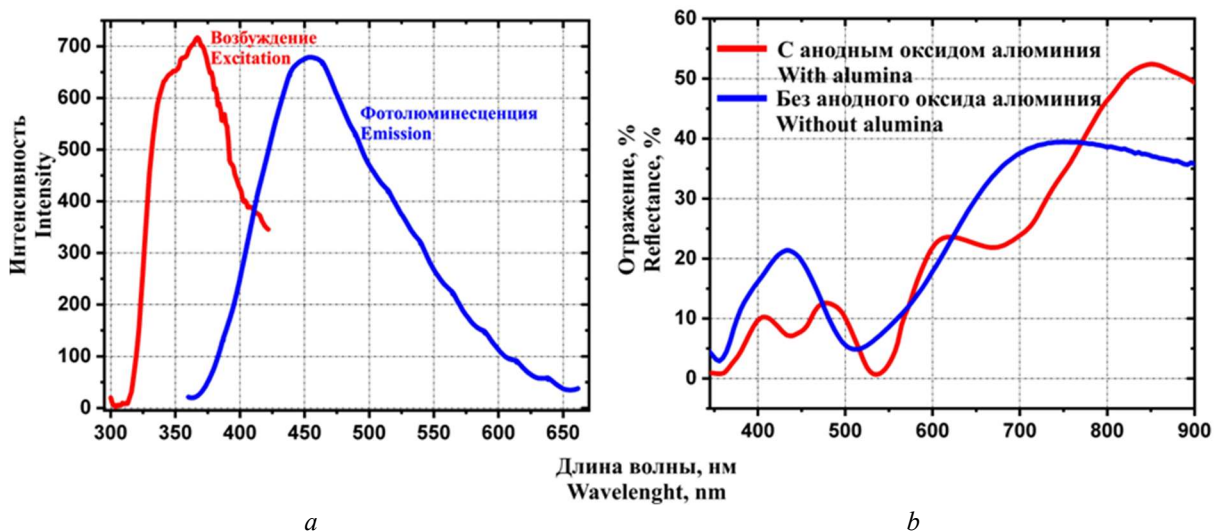


Рис. 2. Фотолюминесцентные (*a*) и оптические (*b*) характеристики анодной композиционной наноструктуры

Fig. 2. Photoluminescence (*a*) and optical (*b*) characteristics of anodic composite nanostructure

Следует отметить, что по причине использования в качестве подложки для АКН кремниевой пластины, исследовать спектральную зависимость пропускания АКН не представлялось возможным. Вероятно, что часть прошедшего оптического излучения через АКН была отражена кремниевой пластиной, но оценить этот вклад на данном этапе исследований не представляется возможным. На длине волны 370 нм оптическое отражение начинает плавно возрастать и с небольшим минимумом на длине волны 440 нм достигает своего пика на длине волны 480 нм, после чего резко уменьшается практически до нулевой отметки на 538 нм. Полное отсутствие отражения на данной длине волны может быть объяснено тем, что весь падающий свет рассеивается на развитой поверхности АКН и кремниевой пластине. После прохождения этого минимума отражение начинает резко возрастать с небольшим минимумом на длине волны 670 нм, предположительно из-за неоднородности поверхности

сильно растягивается в спектре и достигает своего пика на длине волны 850 нм – более половины оптического излучения на данной длине волны отражается. Видно, что отражательная способность образца, не модифицированного АОА, т. е. просто массив наностолбиков оксида ниобия, заметно отличается от модифицированного образца, в котором присутствует поддерживающий слой АОА. В данном случае максимум отражения смещен относительно максимума для АКН в более коротковолновую область и наблюдается на длине волны 744 нм, а отражение принимает меньшее значение и составляет 39,38 %. Также смещен и минимум отражения. В данном случае он наблюдается на длине волны 513 нм, составляет 4,84 %, т. е. в минимуме отражение несколько выше, чем для АКН.

В целом спектр отражения для данного образца имеет заметное сходство в поведении кривой при некотором смещении минимумов и максимумов, имея всего два выраженных пика, что нельзя сказать про спектр отражения для АКН, для которого, как уже было отмечено, характерны небольшие дополнительные минимумы. Такое различие можно объяснить более упорядоченной морфологией поверхности чистого массива наностолбиков оксида ниобия. Что касается АКН, случайное распределение остатков матрицы АОА в упорядоченном массиве наностолбиков оксида ниобия, создавая дополнительные центры рассеяния света в структуре нанокompозита, вызывает более хаотичный процесс распространения света в данном материале, что проявляется в появлении дополнительных экстремумов на кривой отражения АКН по сравнению с чистым массивом столбиков оксида ниобия, свободным от АОА. Другое возможное объяснение можно предложить исходя из того факта, что АКН представляет собой более сложную структуру с двумя слоями с периодически чередующимися показателями преломления (столбики оксида ниобия в поддерживающей их снизу тонкой матрице АОА и слой выступающих из него столбиков анодного оксида ниобия, находящихся в воздухе), а чистый массив столбиков – однослойную структуру с периодически изменяющимся показателем преломления. Взаимодействие света с более сложной структурой АКН приводит к усложнению результирующего спектра отражения в сравнении со спектром массива столбиков оксида ниобия с полностью удаленным АОА. Окончательное выяснение причин различий оптических свойств требует дополнительных исследований, но результаты позволяют управлять оптическими свойствами нанокompозитов на основе анодных оксидов вентильных металлов.

### Заключение

В заключение следует отметить, что сформированная анодная композиционная наноструктура показала эффективное оптическое отражение в диапазоне длин волн от 540 до 1000 нм, а максимальная отражающая эффективность наблюдается на длине волны 850 нм и составляет 52 %. Пик фотолюминесценции наблюдается на длине волны 453 нм. Фотолюминесценция может быть обусловлена оксалат-анионами в анодном оксиде алюминия, но лишь дальнейшие исследования помогут прояснить данный вопрос. Однако сочетание собственных люминесцентных свойств анодного оксида алюминия с фотонно-кристаллическими свойствами анодной композиционной наноструктуры на основе столбиков анодного оксида ниобия при дальнейшей оптимизации процесса формирования анодной композиционной наноструктуры позволит создать материал с многообещающими свойствами для использования в нанооптике, фотонике и микроэлектронике.

### Список литературы / References

1. Pligovka A., Hoha A., Turavets U., Poznyak A., Zakharau Y. Formation features, morphology and optical properties of nanostructures via anodizing Al/Nb on Si and glass. *Materials Today: Proceedings. Elsevier.* 2021;37:A8-A15.
2. Pligovka A., Poznyak A., Norek M. Optical Properties of Porous Alumina Assisted Niobia Nanostructured Films–Designing 2-D Photonic Crystals Based on Hexagonally Arranged Nanocolumns. *Micromachines. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.* 2021;12(6):589.
3. Zhang B.P., Binh N.T., Segawa Y. Optical properties of ZnO rods formed by metalorganic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters. American Institute of Physics AIP.* 2003;83(8):1635-1637.

4. Kim D., Ghicov A., Albu S.P., Schmuki P. Bamboo-Type TiO<sub>2</sub> Nanotubes: Improved Conversion Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society*. American Chemical Society. 2008;130(49):16454-16455.
5. Khatko V., Gorokh G., Mozalev A., Solovei D., Llobet E., Vilanova X., Correig X. Tungsten trioxide sensing layers on highly ordered nanoporous alumina template. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006;118(1-2):255-262.
6. Özer N., Chen D.G., Lampert C.M. Preparation and properties of spin-coated Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films by the sol-gel process for electrochromic applications. *Thin Solid Films*. Elsevier B.V. 1996;277(1-2):162-168.
7. Pytlíček Z., Bendova M., Prasek J., Mozalev A. On-chip sensor solution for hydrogen gas detection with the anodic niobium-oxide nanorod arrays. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. Elsevier B.V. 2019;284:723-735.
8. Ling X., Yuan J., Liu D., Wang Y., Zhang Y., Chen S., Wu H., Jin F., Wu F., Shi G., Tang X., Zheng J., Liu S., Liu Z., Ma W. Room-Temperature Processed Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as the Electron-Transporting Layer for Efficient Planar Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*. American Chemical Society. 2017;9(27):23181-23188.
9. Mozalev A., Bendova M., Vazquez R.M., Pytlíček Z., Llobet E., Hubalek J. Formation and gas-sensing properties of a porous-alumina-assisted 3-D niobium-oxide nanofilm. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. Elsevier B.V. 2016;229:587-598.
10. Pligovka A., Lazavenka A., Gorokh G. Anodic Niobia Column-like 3-D Nanostructures for Semiconductor Devices. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2019;18:790-797.
11. Zhou Y., Qiu Z., Lü M., Zhang A., Ma Q. Preparation and spectroscopic properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorods. *Journal of Luminescence*. 2008;128(8):1369-1372.
12. He J., Hu Y., Wang Z., Lu W., Yang S., Wu G., Wang Y., Wang S., Gu H., Wang J. Hydrothermal growth and optical properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorod arrays. *Journal of Materials Chemistry C. Royal Society of Chemistry*. 2014;2(38):8185-8190.
13. Nourmohammadi A., Asadabadi S.J., Yousefi M.H., Ghasemzadeh M. Photoluminescence emission of nanoporous anodic aluminum oxide films prepared in phosphoric acid. *Nanoscale Research Letters*. 2012;7(1):1-7.
14. Mukhurov N.I., Zhvavyi S.P., Terekhov S.N., Panarin A.Yu., Kotova I.F., Pershukovich P.P., Khodasevich I.A., Gasenkova I.V., Orlovich V.A. Influence of electrolyte composition on photoluminescent properties of anodic aluminum oxide. *Journal of Applied Spectroscopy*. Springer. 2008;75(2):214-218.
15. Pligovka A., Yunin P., Hoha A., Korolyov S., Gorokh G., Skorokhodov E. Morphology and Structure of Defected Niobium Oxide Nonuniform Arrays Formed by Anodizing Bilayer Al/Nb Systems. *Technical Physics*. 2020;65(11):1771-1776.

### Вклад авторов

Гога А.В. выполнил исследование, был ответственным за программное обеспечение, визуализацию, подготовку черновика рукописи, поиск ресурсов, обработку данных.

Позняк А.А. выполнил исследование, подготовил черновик рукописи, утвердил рукопись, провел формальный анализ, был ответственным за поиск ресурсов, визуализацию, обработку данных.

Завадский С.М. выполнил исследование, был ответственным за поиск ресурсов.

Голосов Д.А. утвердил рукопись, провел формальный анализ.

Плиговка А.Н. выполнил исследование, был ответственным за концептуализацию, администрирование и управление проектом, подготовку, обзор и редактирование рукописи, финансирование.

### Authors contribution

Hoha A.V. performed the research, was responsible for the software, visualization, preparation of a draft manuscript, search for resources, data processing.

Poznyak A.A. performed the research, prepared a draft of the manuscript, approved the manuscript, conducted a formal analysis, was responsible for finding resources, visualization, data processing.

Zavadski S.M. performed research, was responsible for finding resources.

Golosov D.A. approved the manuscript, conducted a formal analysis.

Pligovka A.N. performed research, was responsible for conceptualization, administration and project management, preparation, review and editing of the manuscript, funding.

### Сведения об авторах

**Гога А.В.**, стажер, младший научный сотрудник НИЧ НИЛ 4.10 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Позняк А.А.**, к.ф.-м.н, доцент, старший научный сотрудник НИЧ НИЛ 4.10, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Завадский С.М.**, к.т.н, доцент, начальник НИЧ Центра 9.1 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Голосов Д.А.**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЧ Центра 9.1 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Плиговка А.Н.**, к.т.н., старший научный сотрудник НИЧ НИЛ 4.10 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
тел. +375-29-118-97-68;  
e-mail: sash4ka06@yandex.ru  
Гога Александр Владимирович

### Information about the authors

**Hoha A.V.**, Junior Researcher at the R&D Laboratory 4.10 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Poznyak A.A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the R&D Laboratory 4.10, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Zavadski S.M.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Golosov D.A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher at the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Pligovka A.N.**, Cand. of Sci., Senior Researcher at the R&D Laboratory 4.10 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University of Informatics  
and Radioelectronics  
tel. +375-29-118-97-68  
e-mail: sash4ka06@yandex.ru  
Hoha Aliaksandr Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-48-56>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.93'11

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХОЖЕГО АНАТОМИЧЕСКОГО УЧАСТКА НА КТ-ИЗОБРАЖЕНИИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.А. КОСАРЕВА, П.В. КАМЛАЧ, В.А. КОВАЛЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 20 апреля 2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Рассматриваются традиционные алгоритмы определения дескрипторов изображения, такие как SIFT, ORB, LBP, GLSM, для решения задачи поиска схожего анатомического участка на КТ-изображениях лёгких. В статье предлагается методика проведения сравнительного анализа традиционных алгоритмов определения дескрипторов изображений при решении задачи поиска схожего анатомического участка, а также определяются оптимальные анатомические признаки. Алгоритмы апробируются при поиске схожего анатомического слоя в рамках слоев изображений компьютерной томографии лёгких одного пациента, в рамках поиска схожей анатомической формы на слое среди изображений компьютерной томографии лёгких двух пациентов и среди изображений компьютерной томографии лёгких ста пациентов. В результате определено, что в ходе расчета методом GLSM получаются наилучшие результаты при решении задачи классификации анатомической области изображения (усредненная погрешность определения анатомического слоя составляет 5 %). Определено, что оптимальные признаки на КТ-изображении лёгких соответствуют наличию органов: сердца, печени и верхнего края лёгкого. Формулируются выводы о необходимости использования нейросетевых методов для улучшения погрешности определения схожего слоя, содержащего необходимую анатомическую структуру.

**Ключевые слова:** SIFT, ORB, LBP, GLSM, компьютерная томография лёгких, схожая анатомическая область, классификация изображений, традиционные алгоритмы определения дескрипторов, поиск схожего клинического случая.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Косарева А.А., Камлач П.В., Ковалев В.А. Определение схожего анатомического участка на КТ-изображении грудной клетки с использованием традиционных методов выделения признаков изображения. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 48-56.



## DETERMINATION OF A SIMILAR ANATOMICAL AREA ON A CHEST CT IMAGE USING TRADITIONAL IMAGE FEATURE EXTRACTION METHODS

ALEKSANDRA A. KOSAREVA, PAVEL V. KAMLACH, VASSILI A. KOVALEV

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*The Joint Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus  
(Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 20 April 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The traditional image descriptor definition algorithms are considered, such as SIFT, ORB, LBP, GLSM. With the help of them, the searching task for a similar anatomical area on the CT images of the lungs is solved. The article proposes a methodology for performing a comparative traditional algorithms for determining images descriptors analysis and optimal anatomical features. Algorithms are tested when searching for a similar anatomical layer in the framework of the computer tomography images layers of light patient, as part of the search for similar anatomical form on the layer among the computer tomography images of light two patients, and among the images of computed tomography of light hundred patients. As a result, it is determined that GLSM shows the best results when solving the task of classifying an image anatomical area (averaged error of determining the anatomical layer is 5 %). It is determined that the optimal signs on the lungs correspond to the presence of organs: heart, liver and top edge of the lung. Conclusions are formulated about the need to use neural network methods to improve the error in determining the similar layer containing the necessary anatomical structure.

**Keywords:** SIFT, ORB, LBP, GLSM, computed tomography of lung, similar anatomical area, image classification, traditional descriptor definition algorithms, searching for a similar clinical case.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Kosareva A.A., Kamlach P.V., Kovalev V.A. Determination of a Similar Anatomical Area on a Chest CT Image Using Traditional Image Feature Extraction Methods. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 48-56.

### Введение

Компьютерная томография органов грудной клетки – инструментальное исследование, способное диагностировать ряд заболеваний органов дыхательной системы. Это позволяет лечащему доктору своевременно назначить лечение и предотвратить более глубокие патологические изменения. Вариативность развития патологий лёгких, выявляемых с помощью средств компьютерной томографии, влечет за собой повышенную сложность диагностирования. Для решения данной проблемы возникает необходимость разработки системы определения анатомического участка, предназначенной для сравнения смежных диагностических картин пациентов. Данная система может использоваться для проверки схожих клинических случаев и выбора врачом оптимального метода лечения, основанного на опыте лечения других пациентов.

При разработке системы определения анатомического участка используются как традиционные методы работы с изображениями, так и нейросетевые. В данной статье приводятся алгоритмы, показавшие наиболее удачные результаты при выделении признаков изображений, такие как ORB, SIFT, LBP, матрицы совместной встречаемости [1].

### Методика проведения сравнительного анализа традиционных алгоритмов при нахождении схожей анатомической области на КТ-изображении лёгких

Одним из наиболее успешных алгоритмов для определения дескрипторов локальных изображений является SIFT (масштабно-инвариантное преобразование признаков). Общие принципы работы алгоритма включают: выделение ключевых точек; расчет дескрипторов;

поиск парных ключевых точек; оценка расстояний между парами для определения степени «похожести» изображения.

Расстояние между двумя ключевыми точками, найденными с помощью SIFT-алгоритма, определяются с помощью функций разности Гаусса [2]:

$$G_{\sigma} = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-(x^2 + y^2) / 2\sigma^2}, \quad (1)$$

$$D(x, \sigma) = [G_{k\sigma} - G_{\sigma}] \cdot I = I_{k\sigma} - I_{\sigma}, \quad (2)$$

где  $G_{\sigma}$  – оператор размытия по Гауссу со стандартным отклонением  $\sigma$ ,  $I$  – исходное изображение,  $I_{\sigma}$  – изображение, размытое в оттенках серого,  $k$  – коэффициент масштабирования,  $G_{k\sigma}$  – оператор размытия с отклонением  $k\sigma$ ,  $I_{k\sigma}$  – изображение, размытое в оттенках серого, с новым параметром размытия.

Разница размытых по Гауссу изображений (DoG) используется для определения ключевых точек. Сгенерированное масштабное пространство используется для вычисления лапласиана гауссовских приближений, которые инвариантны к масштабу. Пиксели изображения разных масштабов сравниваются между собой. Выделяются ключевые точки, соответствующие локальным экстремумам. На основе групп выделенных точек определяются новые экстремумы, исключаются случайные краевые пиксели, а также пиксели с недостаточной яркостью.

ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) – это комбинация детектора ключевых точек FAST и дескриптора BRIEF со многими модификациями для повышения производительности. FAST позволяет сравнивать яркости пикселей в окружности, с помощью этого оценивается «похожесть» изображения. Яркость пикселя сравнивается с яркостью центра окружности с заданным допустимым порогом яркости, зависящим от решаемой задачи. Используя дескриптор BRIEF, вычисляются двоичные строки из фрагментов изображения [3]. Отдельные биты отражают сравнение пар интенсивностей ключевых точек. Таким образом, алгоритм ORB позволяет выделять схожие по яркости области изображения.

LBP (локальные бинарные шаблоны) – оператор, представляющий собой описание окрестности пикселя изображения в двоичной форме, используется для классификации текстурных изображений. Математически описать принцип работы оператора можно следующим образом:

$$LBP_{p,R} = \sum_0^{p-1} (I - I_0) \cdot 2^p, \quad (3)$$

где  $s$  – переходная функция системы,  $p$  – количество точек,  $I_0$  – яркость центрального пикселя,  $I$  – яркость крайнего пикселя области с радиусом  $R$ .

Матрица совместной встречаемости (GLCM) – матрица, позволяющая рассчитать значения оттенков серого (применимо к нашей задаче) при заданном смещении по изображению. Матрицы встречаемости используются для текстурного анализа изображений, в частности для обработки медицинских изображений [4–5].

Нормализованные матрицы встречаемости рассчитываются по формуле

$$M(i, j, d, \varphi) = \frac{P(i, j, d, \varphi)}{\sum_i \sum_j P(i, j, d, \varphi)}, \quad (4)$$

где  $P(i, j, d, \varphi)$  – матрица встречаемости,  $i$  и  $j$  – яркости соседних точек на изображении, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга, при угловом направлении счета  $\varphi$ .

Для поиска схожих изображений используют признаки: энергия, энтропия, контраст, гомогенность, корреляция. В данном исследовании использовался первичный полученный дескриптор, преобразованный с помощью метода главных компонент (PCA).

Предлагаемая методика апробирует описанные алгоритмы на изображениях компьютерной томографии лёгких и содержит несколько этапов.

Первый этап – этап подготовки данных, включающий в себя определение ключевых анатомических точек и разметку набора данных для дальнейшего тестирования традиционных методов. В ходе эксперимента размечаются 100 изображений компьютерной томографии лёгких, каждое из которых содержит около 150 слоев. Выборка изображений производится случайным образом из большого подготовленного к исследованию архива [6]. В выборку включаются по одному представителю мужского и женского пола в каждом возрасте в интервале от 18 до 90 лет. Формируется список анатомических признаков, который качественно апробируется с точки зрения адекватности рассматриваемыми методами. Исходя из результатов, выбираются анатомические точки, слабо коррелируемые между собой в пространстве признаков. Такие точки позволят наиболее точно оценить разницу результатов работы алгоритмов классификации. В дальнейшем на выбранных признаках проводится количественное тестирование алгоритмов.

Второй этап исследования – тестирование традиционных алгоритмов на выборке изображений в рамках одного пациента. Задача алгоритма состоит в определении соседнего слоя размеченного изображения, схожего со слоем, содержащим искомый анатомический признак. Этот этап эксперимента позволяет определить правильность реализации алгоритмов и оценить расстояние между схожими анатомическими слоями (первично предполагается, что дескриптор соседнего слоя должен быть наиболее близким к дескриптору слоя, содержащего анатомический признак). При этом для оценки близости используется  $l_1$ -норма, а расстояние до искомого слоя оценивается в миллиметрах.

Третий этап исследования – поиск похожего слоя среди слоев изображения другого пациента. В качестве меры оценки адекватности работы алгоритмов используются заранее размеченные по выбранным анатомическим признакам слои и расстояние до этих слоев, посчитанное в миллиметрах. Данный этап необходим для сравнения особенностей работы алгоритмов в рамках одной анатомической формы одного пациента (второй этап) и схожей анатомической формы другого пациента, радикально отличающейся по морфологии. Вводится понятие классификации, необходимое для оценки адекватности работы алгоритмов в случае разнообразия изменения форм.

Четвертый, заключительный, этап состоит в поиске схожих искомому изображений по анатомическому признаку. Используются алгоритмы, показавшие наилучший результат на третьем этапе исследования. Схожие слои ищутся среди всех изображений (13 560 слоев). Выбираются двадцать наиболее близких изображений, проверяется попадание этих изображений в выделенный анатомический класс. Результаты работы алгоритмов сравниваются, формируются выводы.

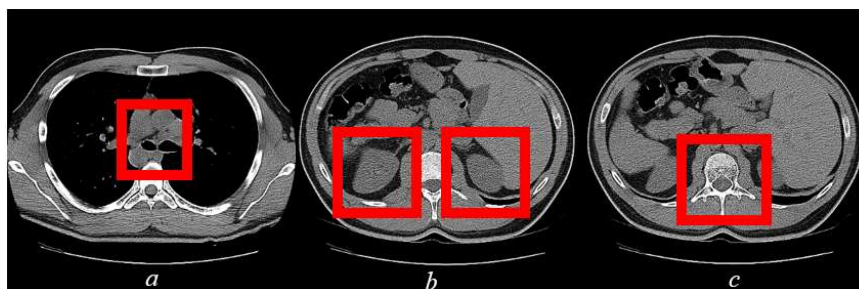
Основной задачей исследования является анализ использования традиционных методов выделения признаков изображений.

### Экспериментальная часть

На первом этапе исследования в качестве ключевых анатомических точек для эксперимента выделяется 23 анатомических признака:

- 12 позвонков грудного отдела (t1-t12);
- точка раздвоения трахеи (bifurcation tracheae) (рис. 1, *a*);
- 1 позвонок поясничного отдела (l1) (рис. 1, *c*);
- верхний край лёгкого (apex pulmonis), нижний край лёгкого (margo inferior pulmonis);
- три ключевых просматриваемых слоя с сердцем – середина сердца, верхний и нижний край сердца;
- верхний край печени (hepatis apex), нижний край печени (margo inferior hepatis);
- два слоя с почками – верхний край почек и слой, где почки хорошо просматриваются по структуре (середина почек) (рис. 2, *b*).

После разметки данных каждое изображение компьютерной томографии преобразовывается в набор PNG(\*.png)-срезов. При этом КТ-изображение рассматривается в значениях от –1500 до 500 по шкале Хаунсфилда, что позволяет сохранить морфологию лёгких и мягких тканей при нормализации [6] и переводе в формат PNG(\*.png).

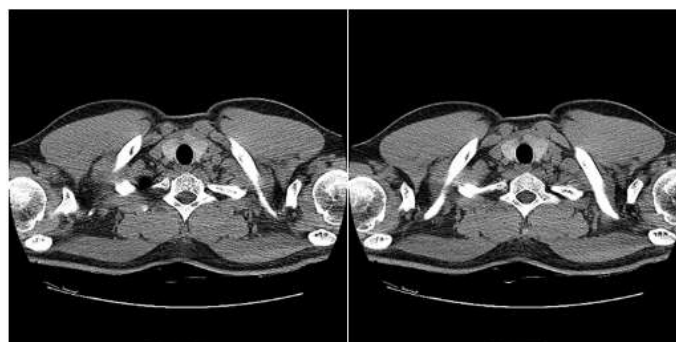


**Рис. 1.** Слой КТ-изображения, содержащий анатомический признак: *a* – точка раздвоения трахеи; *b* – почки; *c* – позвонок поясничного отдела

**Fig. 1.** The CT-image layer containing an anatomical feature: *a* – the split point of the trachea; *b* – kidney; *c* – lumbar vertebra

Следующим шагом эксперимента является апробация традиционных методов, описанных в теоретической части статьи. Преследуются две цели: определение оптимального традиционного метода, определение универсального анатомического признака. При этом для текстурных признаков изображение проходит дополнительный этап обработки – биннинг (разбиение яркости на кванты), позволяющий сгладить текстуру изображения [7].

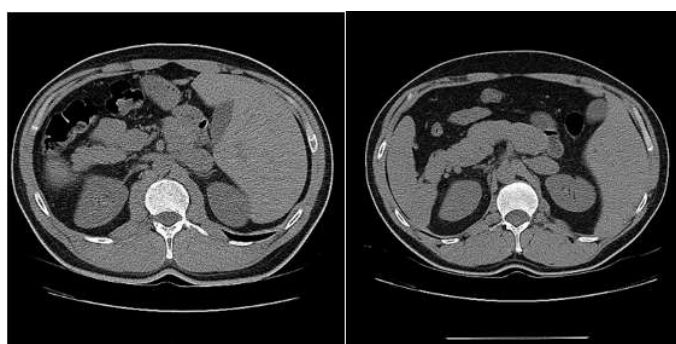
На втором этапе исследования используются изображения одного пациента. При этом рассматриваются три анатомических признака: верхний край лёгкого (рис. 2), почки и сердце. Значения дескрипторов изображений данных признаков оказались слабо коррелированы друг с другом, что позволяет оценить адекватность алгоритмов при решении задачи классификации.



**Рис. 2.** Соседние слои КТ-изображения

**Fig. 2.** Neighboring CT-image layers

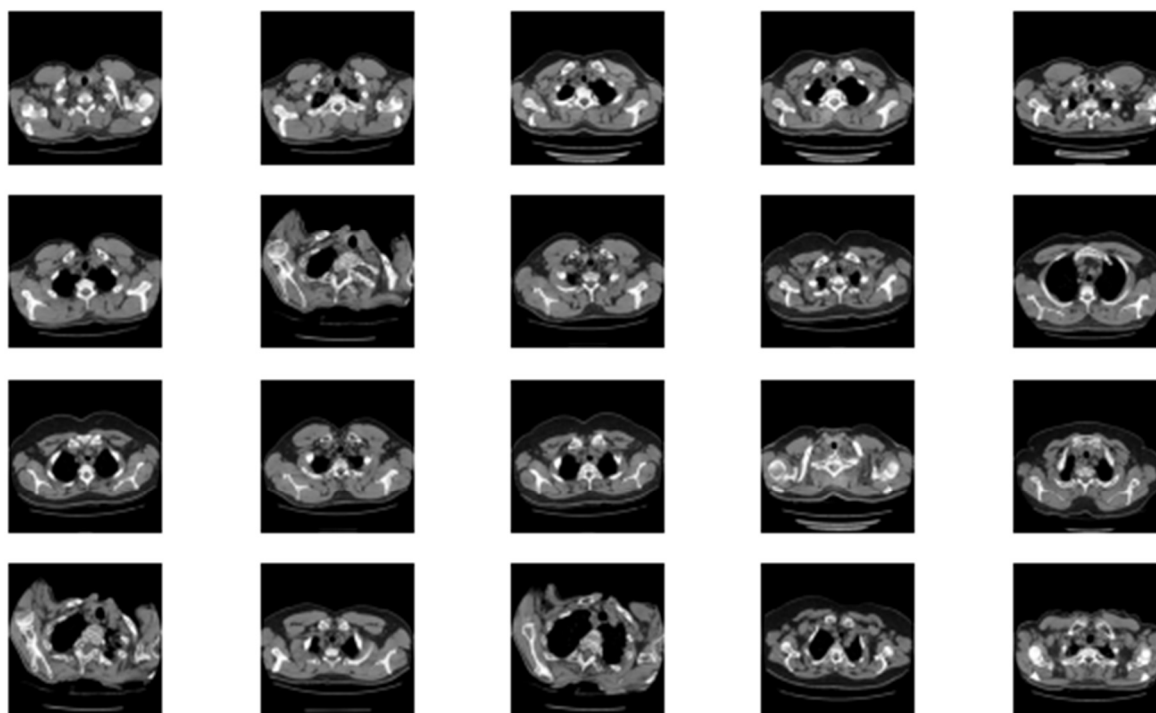
На третьем этапе рассматриваются схожие слои в рамках двух пациентов (рис. 3), что позволит сформулировать выводы о результатах работы дескрипторов ключевых точек (алгоритмы ORB, SIFT).



**Рис. 3.** Схожие по анатомическому признаку слои КТ-изображений двух пациентов

**Fig. 3.** Similar to the anatomical sign of the two patient's CT-images layers

Четвертый этап исследования – сравнение наиболее удачных алгоритмов (LBP, матрицы совместной встречаемости), показавших наилучшие результаты на прошлых этапах. Для этого определялись двадцать ближайших к искомому изображений среди всех слоев КТ-изображения лёгких 100 пациентов (рис. 4).



**Рис. 4.** Окно результатов работы программы, реализующей поиск двадцати ближайших к искомому слою, относящихся к классу «верхний край лёгкого», алгоритм поиска – расчет матриц встречаемости

**Fig. 4.** The results program window of the search for twenty closest to the desired layers belonging to the “apex of lung” class, the search algorithm – GLSM

### Результаты и их обсуждение

Результаты первого этапа исследования представлены в табл. 1. За положительный результат принимается три успешно найденных изображения одной анатомической области из трех среди 2300 слоев КТ-изображений пациентов, содержащих размеченные анатомические признаки. При увеличении входной выборки поиска на 150 % улучшается детектируемость следующих признаков – t1, t4, t12, t11. Признаки, при исследовании которых традиционные дескрипторы показывают худшие результаты – верхний край почек, t9, t6. При этом слои с позвонками часто определяются как соседние позвонки. Особенно это касается позвонков нижней части грудного отдела, где анатомия сильно варьируется. Здесь при одинаковых по номеру позвонках на слое просматриваются разные органы, соответственно, морфология изображения отличается в значительной степени.

**Таблица 1.** Результаты качественной апробации дескрипторов на ключевых точках  
**Table 1.** Positive results of high-quality approbation of descriptors at key points

Признаки	Алгоритмы			
	ORB	SIFT	LBP	GLCM
Верхний край лёгкого	+	+	+	+
Нижний край лёгкого	+	–	+	+
Середина почек	+	–	+	+
t1,t2,t3	–	+	+	+
t5	–	–	+	+
Точка раздвоения трахеи	–	+	+	+
Срез середины сердца	–	+	+	+
Максимальная площадь видимости печени	–	–	+	+

Также снимаемое КТ-изображение зависит от условий проведения исследования, одежды на пациенте, томографа и других факторов. Кроме того, используемый набор данных отличается

наличием патологий внутренних органов и тканей у пациентов разного пола и возраста. Все эти факторы влияют на усиление анатомической разницы между двумя пациентами. Поэтому в качестве лучших признаков следует рассматривать органы, а именно их объектную разметку – верхний, нижний край и середину. Причем слои с просматриваемой средней части органа показывают наилучшую детектируемость. Это объясняется тем, что слои, содержащие органы, зачастую больше коррелируют между собой анатомически, чем слои, содержащие позвонки. Например, сердце и лёгкие, которые можно одновременно наблюдать на срезе.

Из этого вытекает еще одна проблема – коррелируемость значений дескрипторов слоев, содержащих признаки. При исследовании пространства признаков было замечено, что множества, образованные из первых двух главных компонент значений дескрипторов изображений, соответствующих классам «нижний край лёгкого» и «максимальная площадь видимости печени» – частично совпадают, происходит слияние классов. Аналогично класс «точка раздвоения трахеи» по значениям пересекается с классом «начало сердца», класс «конец сердца» – с классом «верхний край печени». При этом класс «почки» пришлось исключить, так как почки просматривались только на 55 % КТ-изображений лёгких. Исходя из этого, для дальнейших исследований используется три класса, соответствующие верху лёгкого, середине сердца, печени.

В результате второго этапа исследования было оценено расстояние между искомым и найденным слоями, содержащими размеченный признак, выраженное в миллиметрах (табл. 2).

**Таблица 2.** Расстояние между искомым и найденным слоями в рамках одного этапа  
**Table 2.** Distance between the desired and found layer in the one stage

Признаки	Алгоритмы			
	ORB	SIFT	LBP	GLSM
Верхний край лёгкого (мм)	0,000	0,000	0,000	0,000
Середина сердца (мм)	0,000	0,000	0,000	0,000
Максимальная площадь видимости печени (мм)	0,000	2,500	60,000	37,500
Среднее значение (мм)	0,000	0,833	20,000	12,500

Алгоритмы определения ключевых точек показывают лучший результат в отличие от текстурных, которые отнесли к третьему классу удаленные слои. Стоит отметить, то на этих слоях находится та же анатомическая структура, т. е. те же почки, но просматриваемые немного под другим углом. Это можно объяснить тем, что орган изменяет свою форму нелинейно, соответственно, исходное предположение о том, что схожий слой идет следующим является упрощенным. Данный этап позволил оценить адекватность реализации алгоритмов и по большей степени был необходим для их настройки.

Третий этап – проверка на другом пациенте. Результаты представлены в табл. 3. Из таблицы видно, что лучшее среднее значение имеют текстурные признаки. При этом ORB-алгоритм отнес к неверному классу «верхний край лёгкого» и «почки», а SIFT – «почки». Алгоритмы определения ключевых точек не только не справляются с задачей поиска размеченного слоя, но и выдают как результат слои, не содержащие искомый анатомический признак.

**Таблица 3.** Расстояние между искомым и найденным слоями в рамках исследования изображений двух пациентов

**Table 3.** The distance between the desired and found layers in the study of images of two patients

Признаки	Алгоритмы			
	ORB	SIFT	LBP	GLSM
Верхний край лёгкого (мм)	80	7,5	10	7,5
Середина сердца (мм)	12,5	72,5	95	95
Максимальная площадь видимости печени (мм)	65	57,5	22,5	22,5
Среднее значение (мм)	52,500	45,833	42,500	41,667

На данном этапе было решено классифицировать изображения в области разметки, так как разметка в рамках исследования изображений двух пациентов является слишком объективной, нет смысла искать конкретный слой и оценивать расстояния между найденным слоем и разметкой. Расстояние между слоями одного пациента отличается от расстояния между слоями другого морфологией анатомических структур. Получить количественную оценку «похожести» фактически невозможно. Поэтому на четвертом этапе исследования лучшие методы

(LBP, GLSM) сравниваются с помощью точности классификации двадцати ближайших изображений (табл. 4). При этом вероятность определения изображения нужного класса по трем ближайшим изображениям в наборе данных составляет 100 %.

**Таблица 4.** Процент определения изображений искомого класса из двадцати ближайших изображений  
**Table 4.** Percentage of defining images of the desired class from twenty closest images

Классы	Алгоритмы	
	LBP	GLSM
Верхний край лёгкого	50 %	100 %
Середина сердца	80 %	85 %
Максимальная площадь видимости печени	100 %	100 %

Исходя из эксперимента четвертого этапа исследования, видно, что GLSM показывает более устойчивый результат при поиске схожего анатомического участка среди большого числа изображений. При поиске схожей анатомической области в рамках двух пациентов (третий этап) алгоритм показывает минимальное отклонение от искомого слоя (41,667 мм). Несмотря на вариабельность анатомии, данный алгоритм позволяет найти смежный клинический случай с максимальной среди исследуемых традиционных методов точностью. Однако из результатов исследования можно сделать вывод, что погрешность определения ключевой анатомической области сохраняется даже при ограничении проблемы поиска задачей классификации. Наихудший результат при поиске двадцати похожих слоев среди изображений всех пациентов – 15 % при определении середины сердца КТ-изображениях лёгких, усредненная погрешность определения схожих слоев в рамках одного класса составляет 5 %. Возникает необходимость исследования нейросетевых признаков изображений, их анализа и сравнения с традиционными методами для определения оптимального алгоритма поиска схожего анатомического участка.

### Список литературы / References

1. Chen, Chao-I, Tsai, Chang-Ming, Wang, Yuanfang, Koppel, Dan. Feature Detector and Descriptor for Medical Images February. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1 Feb., 2009*. DOI:10.1117/12.811210.
2. Solem J.E. *Programming Computer Vision with Python*. O'Reilly Media, 2012.
3. Calonder M., Lepetit V., Strecha C., Fua P. CVLab, Computer Vision. *BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features – ECCV 2010, 11th European Conference on Computer Vision, Heraklion, Crete, Greece, September 5–11, 2010, Proceedings*. Part IV. DOI:10.1007/978-3-642-15561-1\_56.
4. Kovalev V. and Volmer S. Color Co-Occurrence Descriptors for Querying-by-Example. *Int. Conference on Multimedia Modelling, Oct. 12–15, Lausanne, Switzerland. IEEE Comp. Society Press*. 1998:32-38.
5. Liauchuk V, Kovalev V, Safonau I, Stsepankou D, Hesser J. CT image reconstruction with the co-occurrence matrix similarity as regularization term. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Springer*. June 2013;8(1):307-308.
6. Косарева А.А., Снежко Э.В., Камлач П.В., Ковалев В.А. Исследование и подготовка архива КТ-изображений патологий лёгких для системы автоматического поиска заданного анатомического участка. *BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции, Минск, 19–20 мая 2021 г.* Минск: Бестпринт; 2021:253-257. Kosareva A.A., Snezko E.V., Kamlach P.V., Kovalev V.A. [Pulmonary pathologies CT images archive's research and preparation for a given anatomic area automatic system]. *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA i analiz vysokogo urovnya: sbornik nauchnyh statej VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Minsk, May 19–20, 2021*. Minsk: Bestprint; 2021:253-257. (In Russ.)
7. Murphy A., Baba Y. Windowing (CT). Reference article, Radiopaedia.org. (<https://radiopaedia.org/articles/windowing-ct?lang=us>, accessed on 09 Feb. 2022). doi.org/10.53347/rID-52108.
8. Liauchuk V., Kovalev V. Superpixel co-occurrence for quantitative description of biomedical images. *In: XIII Int. Conf. on Pattern Recognition and Information Processing, 3–5 Oct., 2016, Minsk*. Belarus State University; 2016:145-147.

### Вклад авторов

Косарева А.А. разработала методику сравнительного анализа, реализовала алгоритмы, провела эксперименты, интерпретировала результаты и подготовила рукопись статьи.

Камлач П.В. осуществил постановку задачи и научное редактирование статьи.

Ковалев В.А. определил направление и цель исследования, общую структуру эксперимента.

### Authors' contribution

Kosareeva A.A. developed a comparative analysis technique, implemented algorithms, conducted experiments, interpreted the results and prepared the manuscript of the article.

Kamlach P.V. performed the task and scientific editing of the article.

Kovalev V.A. determined the direction and purpose of the study, the overall structure of the experiment.

### Сведения об авторах

**Косарева А.А.**, аспирант, ассистент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Камлач П.В.**, к.т.н., доцент, зам. декана факультета компьютерного проектирования, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Ковалев В.А.**, к.т.н., зав. лабораторией анализа биомедицинских изображений объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

### Information about the authors

**Kosareva A.A.**, Postgraduate, Assistant at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Kamlach P.V.**, Cand. of Sci., Deputy Dean of the Faculty of Computer Design, Associate Professor at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Kovalev V.A.**, Cand. of Sci., Head of the Biomedical Image Analysis Group of the United Institute of Informatics of the National Academy of Sciences of Belarus.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
tel. +375-17-293-88-60;  
e-mail: kosareva@bsuir.by  
Косарева Александра Андреевна

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-17- 293-88-60;  
e-mail: kosareva@bsuir.by  
Kosareva Alexandra Andreevna





<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-57-64>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.382.323

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВОМ БАЗОВОМ КРИСТАЛЛЕ

О.В. ДВОРНИКОВ<sup>1</sup>, В.А. ЧЕХОВСКИЙ<sup>2</sup>, А.В. КУНЦ<sup>2,3</sup>, А.А. ПАВЛЮЧИК<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»  
(г. Минск Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>4</sup>ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 19 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Для производства интегральных аналоговых микросхем малой степени интеграции, предназначенных для работы при температуре до минус 200 °С и/или при поглощенной дозе гамма-излучения до 5 Мрад, создан арсенид-галлиевый базовый кристалл. Тип применяемых в базовом кристалле активных элементов, а именно: ДрНЕМТ с размерами затворов 100 мкм/0,2 мкм и 10 мкм/0,2 мкм; *p-n-p* НВТ, выбран для реализации наиболее распространенных аналоговых схем операционных усилителей, компараторов, повторителей напряжения. Несмотря на небольшое количество доступных для схемотехнического синтеза ДрНЕМТ с большой крутизной и особенности вольтамперных характеристик экспериментальных образцов ДрНЕМТ, исключающие их применение при малых токах стока, на базовом кристалле возможно проектирование схем зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ), содержащих только один тип активного элемента – ДрНЕМТ. При этом правильный выбор рабочей точки транзисторов обеспечивает разработку малошумящих, быстродействующих ЗЧУ с лучшими параметрами по сравнению с кремниевыми ЗЧУ для датчиков с внутренней емкостью до 100 пФ. Так, разработанные на GaAs базовом кристалле ЗЧУ с головными ДрНЕМТ и отношением ширины затвора к его длине, равным  $W/L = 2000$  и  $W/L = 3000$ , характеризуются соответственно током потребления  $I_{CC} = 5,46$  мА и  $I_{CC} = 5,25$  мА, длительностью фронта нарастания  $\tau_R = 10,7$  нс и  $\tau_R = 9,6$  нс, эквивалентным шумовым зарядом  $ENC = 3960$  эл. и  $ENC = 3700$  эл. при емкости датчика 50 пФ, в то время как ЗЧУ с кремниевым головным полевым транзистором, управляемым *p-n*-переходом и каналом *p*-типа, имеет  $W/L = 3870$ ,  $I_{CC} = 6,99$  мА,  $\tau_R = 27,7$  нс,  $ENC = 5360$  эл. при той же емкости датчика.

**Ключевые слова:** GaAs, транзистор с высокой подвижностью электронов, зарядочувствительный усилитель, базовый кристалл.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Дворников О.В., Чеховский В.А., Кунц А.В., Павлючик А.А. Особенности проектирования зарядочувствительных усилителей на арсенид-галлиевом базовом кристалле. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 57-64.

## SPECIFIC DESIGN FEATURES OF CHARGE SENSITIVE AMPLIFIERS ON ARSENIDE GALLIUM MASTER SLICE

OLEG V. DVORNIKOV<sup>1</sup>, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI<sup>2</sup>, ALIAKSEI V. KUNTS<sup>2,3</sup>,  
ALIAKSEI A. PAULYUCHYK<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC) (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>3</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>4</sup>JSC "Minsk Research Institute of Radiomaterials" (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 19 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** For the production of integrated analog circuits with a small-scale integration, which are developed to operate at temperatures up to minus 200 °C and/or with absorbed dose of gamma radiation up to 5 Mrad, a gallium arsenide master slice has been created. The following types of active elements are used in this master slice: DpHEMT with gate dimensions 100 nm/0,2 nm and 10 nm/0,2 nm; *p-n-p* HBT, they were chosen for realization of most common analog circuits of operational amplifiers, comparators, voltage followers. Despite the small number of available DpHEMT with high transconductance for circuit synthesis and volt-ampere characteristics features of DpHEMT experimental samples, which exclude use of those transistors at low drain current, master slice give opportunity for developing charge-sensitive amplifiers (CSA) circuits with only one type of active elements – DpHEMT. At the same time, correct choice of the operating point of transistors provide development of low-noise, high-speed CSAs with better parameters than silicon CSAs for sensors with internal capacitance up to 100 pF. So, developed on GaAs master slice CSA with head DpHEMTs and ratio of the gate width to its length, equal to  $W/L = 2000$  and  $W/L = 3000$ , characterized by current consumption  $I_{CC} = 5,46$  mA and  $I_{CC} = 5,25$  mA, rise time  $\tau_R = 10,7$  ns and  $\tau_R = 9,6$  ns, equivalent noise charge  $ENC = 3960$  el, and  $ENC = 3700$  el. with sensor capacitance of 50 pF, while the CSA with a head silicon *p*-channel junction field-effect transistor  $W/L = 3870$ ,  $I_{CC} = 6,99$  mA,  $\tau_R = 27,7$  ns,  $ENC = 5360$  el. with the same sensor capacitance.

**Keywords:** GaAs, HEMT, charge sensitive amplifier, master slice.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Kunts A.V., Paulyuchyk A.A. Specific Design Features of Charge Sensitive Amplifiers on Arsenide Gallium Master Slice. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 57-64.

### Введение

Для проектирования аналоговых интегральных микросхем (ИМС), сохраняющих работоспособность при температуре до минус 200 °C и высоком уровне воздействия проникающей радиации, разработан технологический маршрут изготовления на одной GaAs подложке *p-n-p* биполярного транзистора с гетеропереходом (heterojunction bipolar transistor, HBT) и транзистора с высокой подвижностью электронов (double-channel pseudomorphic high electron mobility transistor, DpHEMT), а также предложен макет аналогового базового кристалла (БК) с библиотекой основных схемотехнических решений [1]. Такой GaAs БК предназначен для изготовления аналоговых ИМС малой степени интеграции, необходимых в экспериментальной физике, аэрокосмической электронике и специальных измерительных приборах.

Тип активных элементов БК выбран на основании того, что применение комплементарной пары GaAs транзисторов, состоящей из *p-n-p* HBT и DpHEMT, который представляет собой полевой транзистор (Field Effect Transistor, FET) с каналом *n*-типа и большой

граничной частотой, позволяет значительно упростить схемотехнический синтез аналоговых ИМС и улучшить их характеристики [1–4].

Результаты экспериментальных исследований первых тестовых структур ДрНЕМТ, изготовленных по новому технологическому маршруту, выявили необходимость корректировки размеров ДрНЕМТ, применяемых в БК, а именно: формирование затворов всех транзисторов с одной длиной  $L = 0,2$  мкм и ограничение максимальной ширины затвора величиной  $W = 100$  мкм. Проведенное схемотехническое моделирование с учетом новых допустимых размеров ДрНЕМТ подтвердило возможность обеспечения требуемых характеристики основных аналоговых схем: операционных усилителей, компараторов, повторителей напряжения [2]. Однако оно не ответило на вопрос о возможности реализации на GaAs БК зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ), необходимых в аналоговых интерфейсах различных датчиков.

Целью статьи является рассмотрение особенностей проектирования ЗЧУ на GaAs БК с учетом ограниченного уровня параметров его элементов.

### Модернизация зарядочувствительного усилителя и результаты его схемотехнического моделирования

Известно, что основные параметры ЗЧУ, такие как длительность фронта нарастания  $\tau_R$ , эквивалентный шумовой заряд (equivalent noise charge, ENC), главным образом определяются крутизной головного FET [5, 6]:

$$\tau_R \approx (C_D + C_{INP}) \frac{C_\Sigma}{C_F g_M}, \quad (1)$$

$$ENC^2 \approx \frac{2\alpha_{S2} \varphi_T q T_M}{R_F} + \frac{4\alpha_{S1} \varphi_T q (C_D + C_{INP} + C_F)^2}{3T_M g_M}, \quad (2)$$

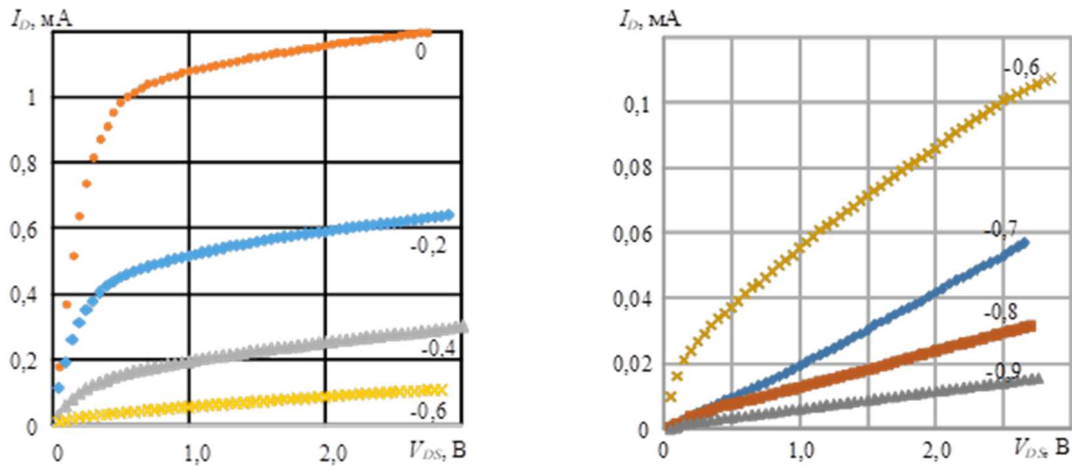
где  $C_D$  – емкость датчика, соединенного с входом ЗЧУ;  $C_{INP}$  – входная емкость ЗЧУ;  $C_\Sigma$  – суммарная емкость всех параллельных цепей, соединенных с высокоимпедансным узлом ЗЧУ;  $C_F$ ,  $R_F$  – емкость и сопротивление в цепи обратной связи ЗЧУ;  $g_M$  – крутизна головного FET ЗЧУ;  $\alpha_{S1}$ ,  $\alpha_{S2}$  – коэффициенты, характеризующие форму выходного сигнала полосового фильтра (ПФ), соединенного с выходом ЗЧУ;  $\varphi_T$  – температурный потенциал;  $T_M$  – время наступления пика импульса на выходе ПФ при подаче на вход ЗЧУ токового сигнала в виде дельта-функции.

Как следует из (1) и (2), увеличение крутизны головного FET и его граничной частоты  $f_T = g_M / 2\pi C_{INP}$  приводит к одновременному уменьшению  $\tau_R$  и одной из составляющих ENC. Именно из этих соображений, а также учитывая, что  $g_M \sim W/L$ , в исходном GaAs БК были применены два ДрНЕМТ с  $W/L = 1000$  мкм/0,2 мкм [1].

Измерения тестовых структур ДрНЕМТ и дальнейшие исследования позволили установить, что:

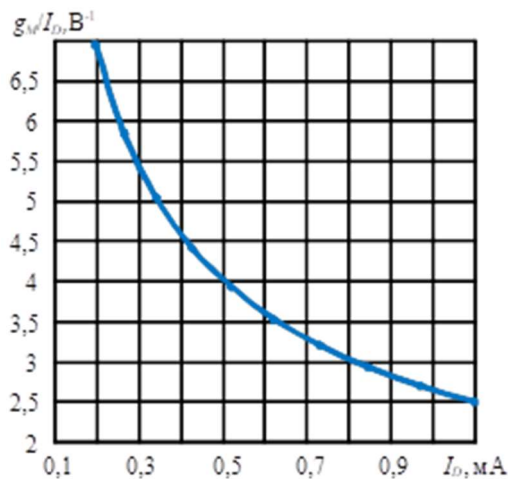
1) транзисторы ДрНЕМТ с  $W/L = 1000$  мкм / 0,2 мкм склонны к самовозбуждению. Практически, их вольт-амперные характеристики (ВАХ) невозможно зарегистрировать без применения фильтрующих цепей, расположенных максимально близко к выводам транзистора на кристалле;

2) по выходной ВАХ в схеме с общим истоком транзистора с  $W/L = 10$  мкм / 0,2 мкм (рис. 1) видно, что ДрНЕМТ имеют две области ВАХ с резко различающимся выходным малосигнальным сопротивлением, характерные для любого FET, только при небольшом обратном напряжении затвор-исток  $|V_{GS}| < 0,4$  В для напряжения отсечки  $V_{TH} = -0,95$  В. При  $|V_{GS}| > 0,6$  В ВАХ ДрНЕМТ имеет вид, подобный управляемому резистору, и эту область не рекомендуется применять в усилительных каскадах, так как она не обеспечит требуемого высокого усиления напряжения.



**Рис. 1.** Выходная ВАХ в схеме с общим истоком ДрНЕМТ ( $W/L = 10 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$ )  
**Fig. 1.** Output VAC in a circuit with a common DpHEMT source ( $W/L = 10 \text{ }\mu\text{m} / 0,2 \text{ }\mu\text{m}$ )

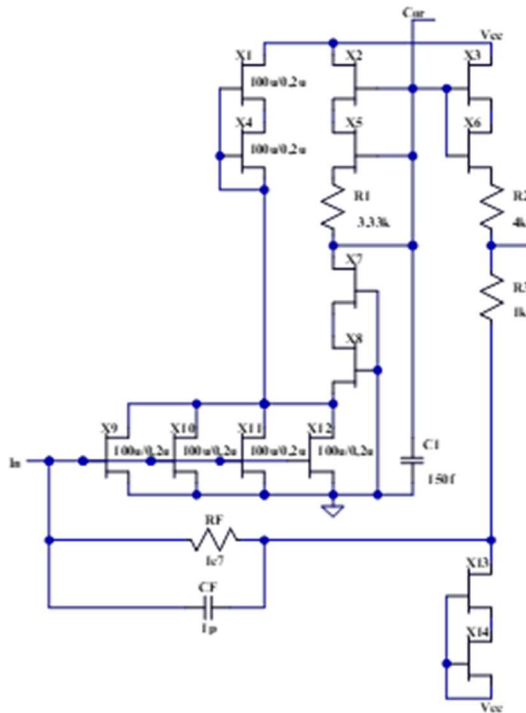
3) Для минимизации энергопотребления наиболее целесообразно применение ДрНЕМТ, работающих при малых токах стока (рис. 2), где обеспечивается максимальное отношение крутизны к току стока  $g_M/I_D$ . Однако с учетом выявленных особенностей ВАХ, наименьшим допустимым током стока является приблизительно 200 мкА для транзистора с  $W/L = 10 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$ , 100 мкА для двух последовательно соединенных транзисторов с  $W/L = 10 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$  и 2 мА для транзистора с  $W/L = 100 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$ .



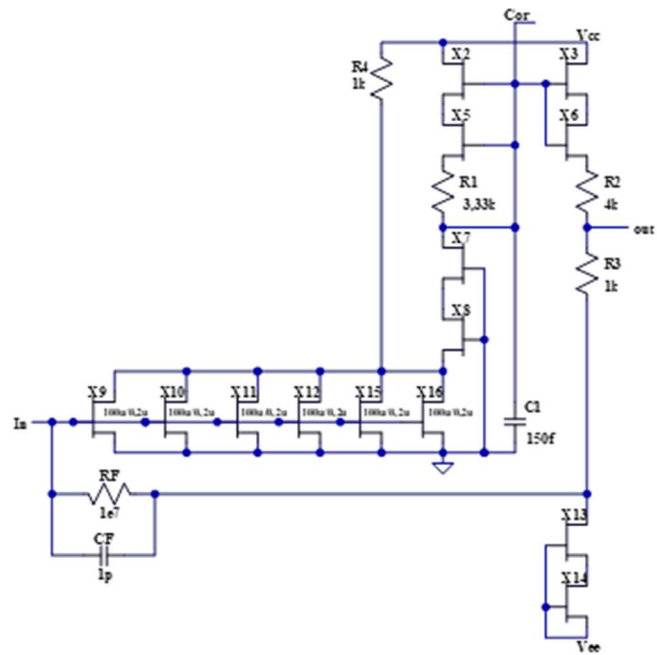
**Рис. 2.** Зависимость отношения  $g_M/I_D$  от тока стока  $I_D$  для ДрНЕМТ ( $W/L = 10 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$ ).  
**Fig. 2.** Dependence  $g_M/I_D$  of drain current  $I_D$  for DpHEMT ( $W/L = 10 \text{ }\mu\text{m} / 0,2 \text{ }\mu\text{m}$ )

4) Схемотехническое моделирование показало, что удовлетворительный уровень параметров основных аналоговых схем обеспечивает применение в качестве входного транзистора дифференциальных каскадов трех параллельно соединенных ДрНЕМТ с  $W/L = 100 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$  [2], а применение ДрНЕМТ с  $W/L = 1000 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$  целесообразно только в ЗЧУ. Таким образом, для снижения площади кристалла и его стоимости, исключения возможного самовозбуждения аналоговых схем принято решение в модернизированном БК использовать только шесть ДрНЕМТ с  $W/L = 100 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$ .

С учетом указанного разработаны ЗЧУ, электрические принципиальные схемы которых для программы LTSpice приведены на рис. 3, 4. Все ДрНЕМТ на электрических схемах имеют размер затвора  $W/L = 10 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$ , который на рисунках не указан. Размер затвора приведен только для ДрНЕМТ с  $W/L = 100 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$ . Требуемое значение сопротивления получено параллельно-последовательным соединением имеющихся на БК 5 кОм резисторов. Так, резистор R1 состоит из параллельного соединения трех 10 кОм резисторов.



**Рис. 3.** ЗЧУ с автоматическим смещением  
головного транзистора  
**Fig. 3.** CSA with automatic biasing of head transistor



**Рис. 4.** ЗЧУ с резисторным смещением  
головного транзистора  
**Fig. 4.** CSA with resistor biasing of head transistor

Показанный на рис. 3 ЗЧУ идентичен по схемотехнике разработанному ранее [1]. Отличия заключаются только в сопротивлениях резисторов, размерах  $W/L$  транзисторов, замене некоторых одиночных ДрНЕМТ на последовательное соединение двух транзисторов. В ЗЧУ на рис. 4 максимально увеличена крутизна головного транзистора за счет параллельного соединения всех доступных на БК ДрНЕМТ с  $100 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$ , однако в этом случае ток стока головного транзистора устанавливается резистором R4.

Для соответствия требованиям пункта 3 ток стока транзисторов составляет: на рис. 3 –  $I_{D9} + I_{D10} + I_{D11} + I_{D12} = 4,86 \text{ мА}$ ,  $I_{D7} = 104,08 \text{ мкА}$ ,  $I_{D13} = 0,50 \text{ мА}$ , ток потребления от положительного источника питания  $I_{CC} = 5,46 \text{ мА}$ , напряжение на выходе при отсутствии входного сигнала  $V_{OUTDC} = 7,03 \text{ мВ}$ ; на рис. 4 –  $I_{D9} + I_{D10} + I_{D11} + I_{D12} + I_{D15} + I_{D16} = 4,65 \text{ мА}$ ,  $I_{D7} = 104,49 \text{ мкА}$ ,  $I_{D13} = 0,50 \text{ мА}$ ,  $I_{CC} = 5,25 \text{ мА}$ ,  $V_{OUTDC} = 16,87 \text{ мВ}$ .

Меньшая крутизна головного транзистора объясняет худшие параметры разработанных ЗЧУ по сравнению с предыдущей версией GaAs ЗЧУ с реализацией головного транзистора в виде двух параллельно соединенных ДрНЕМТ с  $1000 \text{ мкм} / 0,2 \text{ мкм}$  и током стока головного транзистора около  $5,15 \text{ мА}$  [1].

По указанной выше причине, целесообразно сравнение характеристик (рис. 5, 6) предложенных схем с ЗЧУ, головным элементом которого является Si  $p$ -JFET с  $W/L = 3870$  [7], работающий при токе стока около  $5,61 \text{ мА}$ .

Как следует из зависимостей, показанных на рис. 5, 6, разработанные на GaAs базовом кристалле ЗЧУ имеют существенно лучшее быстродействие по сравнению с кремниевым ЗЧУ в диапазоне емкостей датчиков от  $10$  до  $500 \text{ пФ}$  с одновременно меньшим током потребления ( $6,99 \text{ мА}$  для Si ЗЧУ,  $5,46 \text{ мА}$  для ЗЧУ на рис. 3,  $5,25 \text{ мА}$  для ЗЧУ на рис. 4) и уровнем шумов при емкости датчиков от  $10$  до  $100 \text{ пФ}$ .

Таким образом, несмотря на то, что разработанный GaAs БК предназначен для создания наиболее распространенных аналоговых схем, а именно: операционных усилителей, компараторов, повторителей напряжения, на основе БК возможно изготовление малощумящих, быстродействующих ЗЧУ для обработки сигналов датчиков с внутренней емкостью до  $100 \text{ пФ}$ .

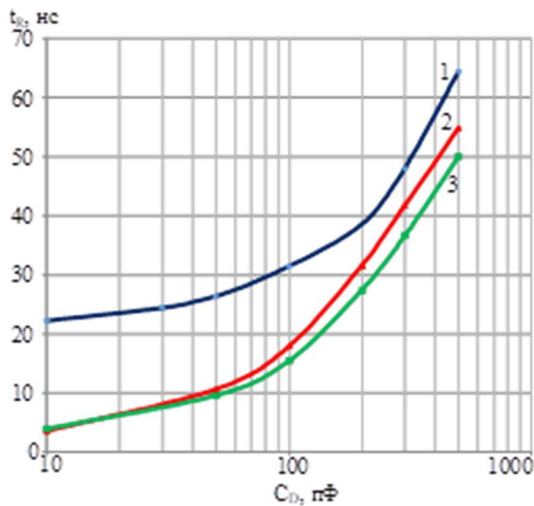


Рис. 5. Зависимость длительности фронта нарастания ЗЧУ  $\tau_R$  от емкости датчика  $C_D$ :

1 – Si ЗЧУ; 2 – GaAs ЗЧУ на рис. 3;  
3 – GaAs ЗЧУ на рис. 4

Fig. 5. CSA rise time dependence  $\tau_R$  of sensor capacity  $C_D$ :  
1 – Si CSA; 2 – GaAs CSA on fig. 3;  
3 – GaAs CSA on fig. 4

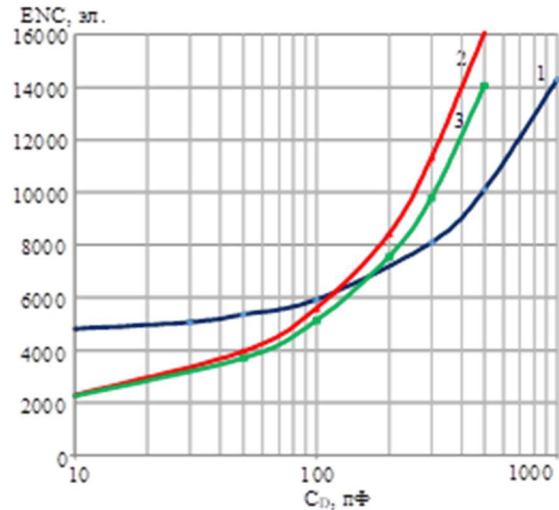


Рис. 6. Зависимость эквивалентного шумового заряда ENC (в электронах) от емкости датчика  $C_D$ :

1 – Si ЗЧУ; 2 – GaAs ЗЧУ на рис. 3;  
3 – GaAs ЗЧУ на рис. 4

Fig. 6. ENC dependence (in electrons) of sensor capacity  $C_D$ : 1 – Si CSA; 2 – GaAs CSA on fig. 3;  
3 – GaAs CSA on fig. 4

## Заключение

Для производства ИМС малой степени интеграции, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации, создан арсенид-галлиевый базовый кристалл. Тип применяемых в базовом кристалле активных элементов, а именно: ДрНЕМТ с размерами затворов 100 мкм / 0,2 мкм и 10 мкм / 0,2 мкм и *p-n-p* НВТ, выбран для реализации наиболее распространенных аналоговых схем операционных усилителей, компараторов, повторителей напряжения.

Несмотря на небольшое количество доступных для схемотехнического синтеза ДрНЕМТ с большой крутизной усиления и особенности вольт-амперных характеристик экспериментальных образцов ДрНЕМТ, исключающие их применение при малых токах стока, на базовом кристалле возможно проектирование схем ЗЧУ, содержащих только один тип активного элемента – ДрНЕМТ. При этом правильный выбор рабочей точки транзисторов обеспечивает разработку малошумящих, быстродействующих ЗЧУ, имеющих лучшие параметры по сравнению с кремниевыми ЗЧУ при обработке сигналов датчиков с внутренней емкостью до 100 пФ.

## Список литературы

1. Дворников О.В., Павлючик А.А., Прокопенко Н.Н., Чеховский В.А., Кунц А.В., Чумаков В.Е. Арсенид-галлиевый аналоговый базовый кристалл. *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2021;2:47-54. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-2-47-54.
2. Дворников О.В., Павлючик А.А., Прокопенко Н.Н., Чеховский В.А., Кунц А.В., Чумаков В.Е. Унифицированные схемотехнические решения аналоговых арсенид-галлиевых микросхем. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2022;27(4):475-488. DOI: 10.24151/1561-5405-2022-27-4-475-488.
3. Fresina M. Trends in GaAs HBTs for wireless and RF. *2011 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*. 2011:150-153. DOI: 10.1109/BCTM.2011.6082769.
4. Zampardi P.J., Sun M., Cismaru C. and Li J. Prospects for a BiCFET III-V HBT Process. *2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*. 2012: 1-3. DOI: 10.1109/CSICS.2012.6340116.

5. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N. and Titov A. E. Comparison of Fast Response and Noise of Charge-Sensitive Amplifiers with Various Types of Input Fets. *2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina*. 2020:1-6. DOI: 10.1109/INDEL50386.2020.9266185.
6. Radeka V. Low-noise techniques in detectors. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 1988;38:217-277.
7. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V. Reducing noises of high-speed Bi-JFET charge-sensitive amplifiers during schematic design. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 862 (2020), 022068IOP*. DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022068.

### References

1. Dvornikov O. V., Paulyuchyk A.A., Prokopenko N.N., Tchekhovsky V.A., Kunts A.V., Chumakov V.E. [GaAs analog master slice]. *Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development – MES*. 2021;2:47-54. DOI:10.31114/2078-7707-2021-2-47-54. (In Russ.)
2. Dvornikov O.V., Paulyuchyk A.A., Prokopenko N.N., Tchekhovsky V.A., Kunts A.V., Chumakov V.E. [Unified circuit solutions for analog gallium arsenide microcircuits]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Electronica*. 2022;27(4):475-488. DOI: 10.24151/1561-5405-2022-27-4-475-488. (In Russ.)
3. Fresina M. Trends in GaAs HBTs for wireless and RF. *2011 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*. 2011: 150-153. DOI: 10.1109/BCTM.2011.6082769.
4. Zampardi P.J., Sun M., Cismaru C. and Li J. Prospects for a BiCFET III-V HBT Process. *2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*. 2012: 1-3. DOI: 10.1109/CSICS.2012.6340116.
5. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N. and Titov A. E. Comparison of Fast Response and Noise of Charge-Sensitive Amplifiers with Various Types of Input Fets. *2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina*. 2020:1-6. DOI: 10.1109/INDEL50386.2020.9266185
6. Radeka V. Low-noise techniques in detectors. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 1988;38:217-277.
7. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V. Reducing noises of high-speed Bi-JFET charge-sensitive amplifiers during schematic design. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 862 (2020), 022068IOP*. DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022068.

### Вклад авторов

Дворников О.В. выполнил анализ современного состояния проблемы по теме работы, сформулировал цель и задачи исследований, осуществлял научное руководство.

Чеховский В.А. участвовал в разработке схем.

Кунц А.В. участвовал в измерениях параметров DpHEMT, выполнил синтез и схемотехническое моделирование схем.

Павлючик А.А. участвовал в измерениях параметров DpHEMT.

### Authors' contribution

Dvornikov O.V. has analyzed the current state of the problem, formulated the goals and objectives of the work and acted as a scientific advisor.

Tchekhovsky V.A. took part in circuit development.

Kunts A.V. took part in DpHEMT parameters measurements, made synthesis and circuit modeling.

Paulyuchyk A.A. took part in DpHEMT parameters measurements.

### Сведения об авторах

**Дворников О.В.**, д.т.н., доцент, главный научный сотрудник Минского научно-исследовательского приборостроительного института.

### Information about the authors

**Dvornikov O.V.**, Dr. of Sci., Associate Professor, Chief Research Scientist of Minsk Research Instrument-Making Institute JSC.

**Чеховский В.А.**, исполняющий обязанности заведующего лабораторией «Электронные методы и средства эксперимента» Института ядерных проблем Белорусского государственного университета.

**Кунц А.В.**, аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, младший научный сотрудник лаборатории электронных методов и средств эксперимента Института ядерных проблем Белорусского государственного университета.

**Павлючик А.А.**, заместитель директора по научной работе и инновациям – начальник НПЦ «Технология» ОАО «Минский НИИ радиоматериалов».

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
tel. +375-44-726-30-92;  
e-mail: alexeykunts97@gmail.com  
Кунц Алексей Вадимович

**Tchekhovski V.A.**, Acting Laboratory Manager of Electronic Methods and Experiment Means Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

**Kunts A.V.**, Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Junior Researcher of Electronic Methods and Experiment Means Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

**Paulyuchyк А.А.**, Deputy Director for Research and Innovations – Head of SPC “Technology” OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials”.

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-44-726-30-92;  
e-mail: alexeykunts97@gmail.com  
Kunts Aliaksei Vadimovich





<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-65-72>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396.962.25

## САМОХОДНЫЙ ПОДПОВЕРХНОСТНЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ МАЛОЗАГЛУБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

И.Ю. МАЛЕВИЧ, А.С. ЛОПАТЧЕНКО, Т.В. ШУКЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 19 января 2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Портативные, подвижные и мобильные подповерхностные радиолокационные обнаружители высоко востребованы для локализации неоднородностей и скрытых дефектов при мониторинге состояния дорожных покрытий, исследовании верхнего слоя земной поверхности при гуманитарном разминировании и выявлении схронов. Несмотря на наличие ряда специализированных устройств, проблема обеспечения надежного оперативного обнаружения приповерхностных и малоуглубленных объектов до конца не решена. Одно из перспективных направлений разработки подповерхностного радиолокационного обнаружителя с повышенной эффективностью обнаружения объектов при заглублении до  $1,5 \dots 2 \lambda$  связано с использованием непрерывного сверхширокополосного линейно-частотно-модулированного зондирующего сигнала и оптимизацией конструктивного построения системы, обеспечивающего поддержание заданной высоты подъема антенного блока над исследуемой средой при его высокой мобильности. В статье приведены результаты разработки самоходного подповерхностного радиолокационного обнаружителя с непрерывным зондирующим сигналом, включающие обоснование технического облика прибора, разработку концепт-макета и результаты экспериментальных исследований. Прибор выполнен на четырехколесной автоматизированной платформе с регулируемой консолью, на которой перемещается антенный блок. При поступательном движении платформы выполняется последовательный радиолокационный обзор верхнего слоя грунта, результаты которого в виде поверхностной проекции нормированной мощности глубинных портретов выводятся на экран монитора. Проведенные натурные испытания прибора показали надежное обнаружение при- и подповерхностных объектов, выполненных из диэлектрических и металлических материалов.

**Ключевые слова:** подповерхностный радиолокационный обнаружитель малоуглубленных объектов, ЛЧМ радар подповерхностного зондирования, георадар.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Малевич И.Ю., Лопатченко А.С., Шукевич Т.В. Самоходный подповерхностный радиолокационный обнаружитель малоуглубленных объектов. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 65-72.

## SELF-PROPELLED SUBSURFACE RADAR DETECTOR OF LOW-DEPTH OBJECTS

IGOR Yu. MALEVICH, ALEKSANDR S. LOPATCHENKO, TATIANA V. SHUKEVICH

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 19 January 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** Portable, mobile and mobile subsurface radar detectors are in high needed for localizing inhomogeneities and hidden defects in monitoring the condition of road surfaces, studying the upper layer of the earth's surface during humanitarian demining and identifying caches. Despite the presence of a number of specialized devices, the problem of ensuring reliable operational detection of near-surface and shallow objects has not been fully resolved. One of the promising directions in the development of a subsurface radar detector with an increased efficiency of object detection when deepening up to  $1,5 \dots 2 \lambda$  is associated with the use of a continuous ultra-wideband FMCW signal and optimization of the structural design of the system, which ensures the maintenance of a given height of rise of the antenna unit above the studied environment with its high mobility. The article presents the results of the development of a self-propelled subsurface radar detector with a continuous probing signal, including the substantiation of the technical appearance of the device, the development of a concept layout and the results of experimental studies. The device is made on a four-wheeled automated platform with an adjustable console on which the antenna unit moves. With the forward movement of the platform, a sequential radar survey of the upper soil layer is performed, the results of which in the form of a surface projection of the normalized power of depth portraits are displayed on the monitor screen. The conducted field tests of the device showed reliable detection of near- and subsurface objects made of dielectric and metallic materials.

**Keywords:** GPR, FMCW subsurface radar detector, ground radar detector.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Malevich I.Yu., Lopatchenko A.S., Shukevich T.V. Self-propelled Subsurface Radar Detector of Low-depth Objects. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 65-72.

### Введение

Портативные, подвижные и мобильные подповерхностные радиолокационные обнаружители высоко востребованы для локализации неоднородностей и скрытых дефектов при мониторинге состояния дорожных покрытий, исследовании верхнего слоя земной поверхности при гуманитарном разминировании и выявлении схронов. Несмотря на наличие ряда специализированных устройств, проблема обеспечения надежного оперативного обнаружения приповерхностных и малозаглубленных объектов до конца не решена.

Одно из перспективных направлений разработки подповерхностного радиолокационного обнаружителя с повышенной эффективностью обнаружения объектов при заглублении до  $1,5 \dots 2 \lambda$  связано с использованием непрерывного сверхширокополосного линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) зондирующего сигнала (ЗС) [1–5] и оптимизацией конструктивного построения системы, обеспечивающего поддержание заданной высоты подъема антенного блока (АБ) над исследуемой средой при его высокой мобильности.

### Разработка облика самоходного подповерхностного радиолокационного обнаружителя

В соответствии с заявленными требованиями, подповерхностный радиолокационный обнаружитель может быть выполнен на автоматизированной платформе с консолью для АБ. Мобильность и устойчивость конструкции обеспечиваются четырехколесным шасси,

на платформе которого разместятся источник электропитания и аппаратура, реализующая метод частотной дальнометрии с использованием сверхширокополосного ЛЧМ ЗС.

Такой самоходный подповерхностный радиолокационный обнаружитель (СПРО) позволит реализовать механическое сканирование АБ по двум координатам – в поперечном направлении за счет перемещения по консоли, в продольном – в процессе передвижения самой платформы. При этом высота подъема АБ над поверхностью исследуемого участка грунта, определяемая условиями работы прибора, задается и регулируется положением консоли.

Обнаружение при- и подповерхностных объектов в СПРО основано на определении частотных компонент ( $f_{\text{об}}$ ), соответствующих отражающим объектам, в спектрограмме эхо-сигнала, полученного в результате гомодинного преобразования в квадратурных каналах радиотракта. Блок оцифровки записывает реализации квадратурных компонент откликов ( $I(t)$ ,  $Q(t)$ ), выделенных фильтрами нижних частот, и передает их в спецвычислитель, выполняющий спектральное оценивание. На основании найденного спектрального портрета спецвычислитель в режиме реального времени выполняет алгоритмы обнаружения и распознавания заглубленного объекта (используя в качестве критерия значения толщины и протяженности) и передает данные в устройство индикации.

С учетом рассмотренных подходов и результатов работ [5–8] структурное решение СПРО принимает вид, показанный на рис. 1.

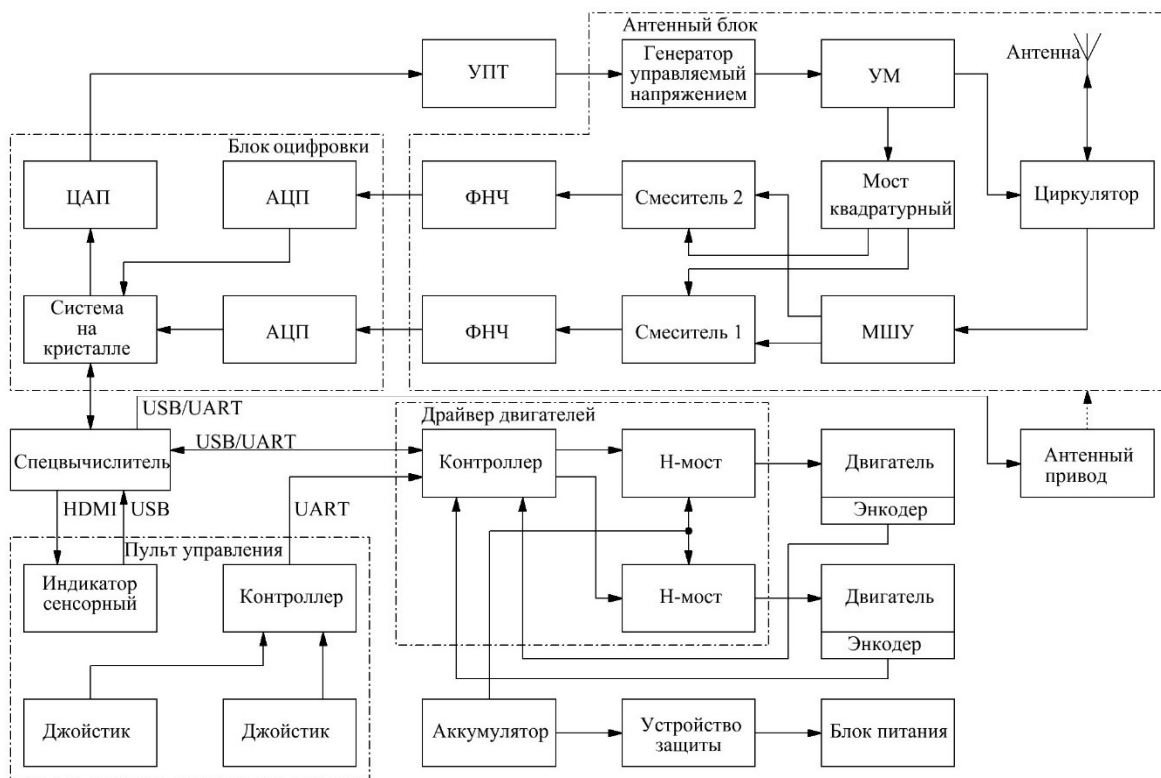


Рис. 1. Структурная схема СПРО  
Fig. 1. Structure of SSRD

Конструктивное решение СПРО, разработанное в соответствии с рассмотренными принципами, с учетом автономности и необходимости обслуживания прибора одним оператором представлено на рис. 2.

СПРО выполняется в виде имеющей привод телеуправляемой автоматизированной платформы, на которой размещены исполнительные механизмы, оборудование и аккумулятор. Управление системой осуществляется с пульта дистанционного управления, имеющего индикатор с сенсорным экраном для отображения данных и изменения настроек системы. АБ с антенным приводом вынесены на консоль, а аппаратура СПРО и аккумулятор размещаются во внутренних отсеках прибора.

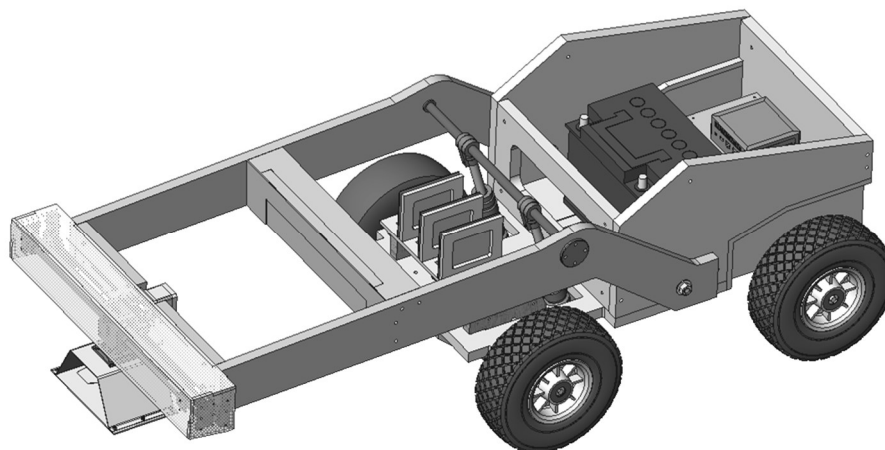


Рис. 2. Конструктивное решение СПРО  
Fig. 2. SSRD design

### Макет самоходного подповерхностного радиолокационного обнаружителя

Макет СПРО, реализованный в соответствии с проектным обликом, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид макета СПРО  
Fig. 3. General view of SSRD

Несущий корпус платформы и кронштейны консоли выполнены из пластика, что позволяет минимизировать переотражения ЗС, влияющие на работу СПРО. Консоль устанавливается над поверхностью грунта на фиксированных высотах 3, 10 либо 15 см и обеспечивает поперечное сканирование АБ.

Платформа приводится в движение мотор-редукторами постоянного тока, управление которыми осуществляется ШИМ-контроллером, связанным с джойстиком на пульте дистанционного управления. Плавность управления и поддержание стабильной скорости передвижения достигаются за счет организации обратной связи с энкодерами, установленными на осях двигателей.

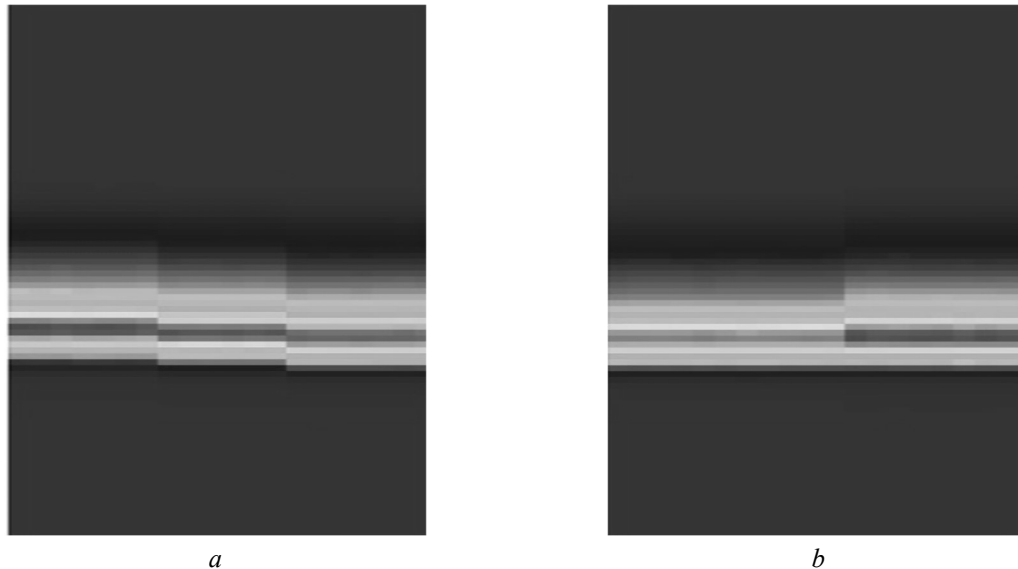
Гомодинный радиотракт СПРО позволяет формировать и обрабатывать ЛЧМ сигналы с базой 3000...8000 в диапазоне 1000...2000 МГц, выходная мощность устройства составляет 25 мВт, коэффициент шума не превышает 7 дБ, динамический диапазон – не менее 80 дБ.

Блок оцифровки реализован на основе демонстрационной платы *STEMlab 125-14*, содержащей систему на кристалле *Xilinx Zynq 7010* и двухканальные 14-разрядные АЦП и ЦАП с тактовой частотой 125 МГц. Канал ЦАП используется для формирования линейного пилообразного импульса, который после масштабирования в усилителе постоянного тока (УПТ) модулирует СВЧ-сигнал генератора, управляемого напряжением. Синхронно с формированием модулирующего импульса два канала АЦП используются для записи комплексной реализации

сигнала ( $I(t)$ ,  $Q(t)$ ), получаемой на выходах квадратурных каналов в результате гомодинного преобразования принятых эхо-сигналов. Полученная реализация передается на спецвычислитель, где выполняются алгоритмы спектрального оценивания.

Спецвычислитель на основании коррелограммного метода спектрального оценивания производит первичную обработку измерительных данных. В случае обнаружения объекта по методу максимального правдоподобия [5, 7, 9] вычисляется уточненный глубинный портрет.

На рис. 4 представлены результаты инструментальных исследований чувствительности СПРО к неоднородностям среды при моделировании распространения сигнала в ВЧ-кабеле с использованием кабельных вставок и аттенюатора.



**Рис.4.** Визуализация тестовых сигналов на устройстве индикации СПРО: *a* – две кабельные вставки длиной 3 см; *b* – аттенюаторная вставка 10 дБ длиной 3 см

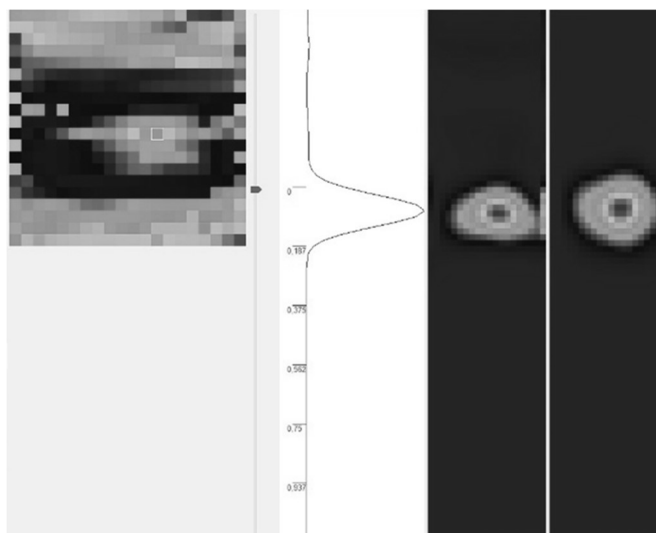
**Fig. 4.** Visualization of test signals on the display device SSRD: *a* – two cable inserts 3 cm long; *b* – 10 dB attenuator insert 3 cm long

Видно, что две кабельные вставки длиной по 3 см обеспечивают четкое (визуально регистрируемое) смещение пика спектральной составляющей, которое отображается на глубинном портрете, формируемом СПРО (рис. 4, *a*). Использование аттенюаторной вставки 10 дБ, наряду со смещением пика спектральной составляющей (рис. 4, *b*), приводит к его пропорциональному уменьшению.

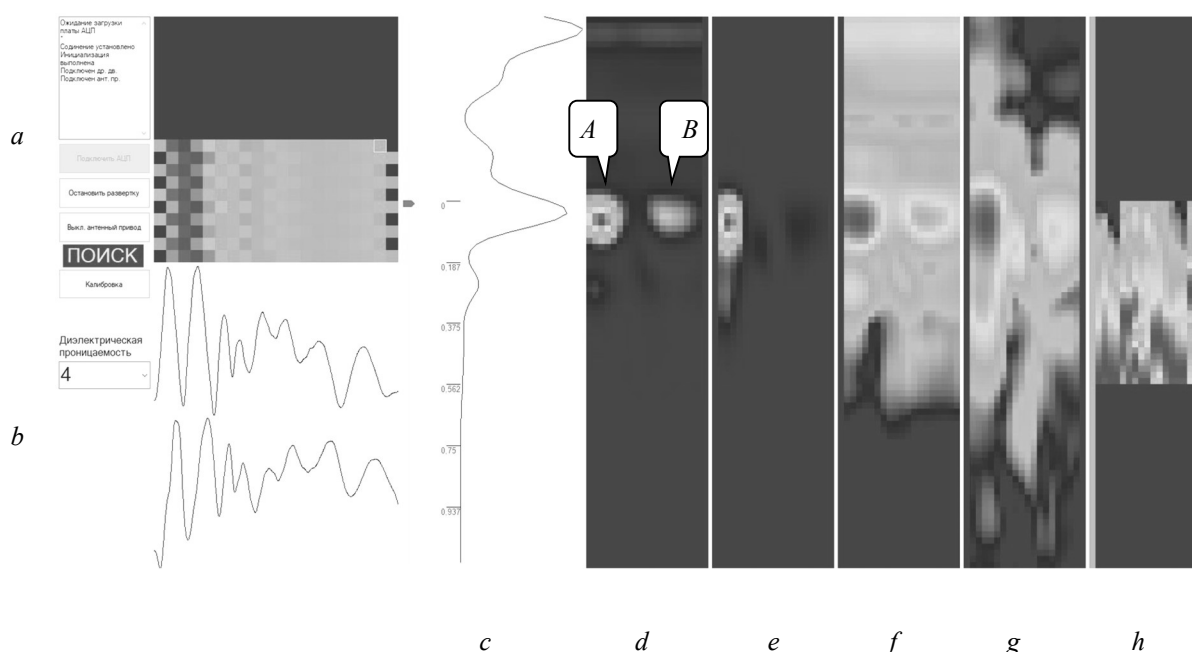
При поступательном перемещении платформы с одновременным механическим сканированием в поперечной плоскости АБ, расположенного на консоли, выполняется последовательный радиолокационный обзор верхнего слоя грунта, результаты которого в виде проекции нормированной мощности глубинных портретов на горизонтальную плоскость с привязкой к перемещению СПРО выводятся на экран монитора (рис. 5, левый верхний квадрант).

В центральной части экрана отображается огибающая амплитудного спектра принятого эхо-сигнала, а в правой части – поле с результатами первичной обработки данных о глубинной структуре среды и поле с глубинным портретом объекта, полученным при вычитании сглаженной реализации сигнала, записанной при калибровке системы.

Полнофункциональный вид экрана индикатора СПРО показан на рис. 6 и содержит: изображение проекции мощности глубинных портретов на горизонтальную плоскость (рис. 6, *a*); осциллограммы квадратурных составляющих эхо-сигнала и его спектрограмму (рис. 6, *b, c*); пять полей (рис. 6, *d-h*) для отображения глубинной структуры среды в процессе сканирования АБ, соответственно результаты обработки данных коррелограммным методом, коррелограммным методом с взвешенным вычитанием помех, дублирование первых двух полей в логарифмическом масштабе и результат применения метода максимального правдоподобия.



**Рис. 5.** Отображение приповерхностного диэлектрического объекта (камень) на экране СПРО  
**Fig. 5.** Displaying a near-surface dielectric object (stone) on the SSRD screen



**Рис. 6.** Общий вид экрана индикатора СПРО в процессе обнаружения подповерхностного объекта  
**Fig. 6.** General view of the SSRD indicator screen in the process of detecting a subsurface object

Здесь при стендовых испытаниях СПРО в качестве объектов обнаружения (*A, B*) использовались диэлектрические бруски размером  $10 \times 8 \times 6,5$  см, выполненные из камня (*A*,  $\epsilon_r = 5 \dots 7$ ) и дерева (*B*,  $\epsilon_r = 2,5 \dots 3$ ), которые располагались на расстоянии 10 см от *AB* в структуре панели широкодиапазонного поглотителя электромагнитных волн ТОРА-39.

На вертикальной линейке рис. 6, *d* хорошо видны радиолокационные изображения двух тестовых объектов (*A, B*), полученные в результате первичной обработки измерительных данных коррелограммным методом. Результаты вычитания фона (рис. 6, *e*) и отображение глубинных портретов в логарифмическом масштабе (рис. 6, *f, g*) позволяют детализировать структуру исследуемой среды.

На линейку рис. 6, *h* выведен уточненный глубинный портрет – результат применения метода максимального правдоподобия. Здесь в местах расположения тестовых объектов наблюдаются их четкие контуры.

Очевидна хорошая согласованность полученного радиолокационного изображения с физической структурой исследуемой среды и объектов.

## Заключение

Приведены результаты разработки самоходного подповерхностного радиолокационного обнаружителя с непрерывным зондирующим сигналом, включающие обоснование технического облика прибора, разработку концепт-макета и результаты экспериментальных исследований.

Прибор позволяет бесконтактно, поддерживая фиксированную высоту подъема антенного блока над поверхностью, с высокой оперативностью и мобильностью выполнять площадные исследования глубинного портрета верхнего слоя земной поверхности при проведении мероприятий по мониторингу состояния дорожных покрытий, гуманитарному разминированию и выявлению скрытно установленных при- и подповерхностных объектов, выполненных из диэлектрических и металлических материалов.

Проведенные площадные испытания показали высокий потенциал прибора и возможности совершенствования отдельных подсистем.

## Список литературы

1. *Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии.* Под ред. М.И. Филькенштейна. М.: Недра; 1986.
2. *Вопросы подповерхностной радиолокации.* Под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника; 2005.
3. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Barton D.K. *Fundamentals of Short-Range FM Radar.* Horwood.: Artech House Publishers; 2003.
4. Daniels D.J. *Ground Penetrating Radar.* London: The Institution of Electrical Engineers; 2004.
5. Малевич И.Ю., Лопатченко А.С. Портативный ЛЧМ-радар подповерхностного зондирования. *Доклады БГУИР.* 2019;1(119):75-82.
6. Малевич И.Ю., Лопатченко А.С., Шукевич Т.В., Меледин К.И. Приемно-передающий тракт гомодинного типа с квадратурными каналами для ЛЧМ радара подповерхностного зондирования. *Проблемы инфокоммуникаций.* 2019;2(10):12-17.
7. Лопатченко А.С., Малевич И.Ю., Савенко С.А. ЛЧМ-радиолокатор подповерхностного зондирования с повышенной разрешающей способностью. *Доклады БГУИР.* 2015;3(89):43-48.
8. Бобков Ю.Ю., Малевич И.Ю., Лопатченко А.С., Шукевич Т.В. Антенна УВЧ диапазона для радара подповерхностного зондирования. *Материалы XXV Международной научно-технической конференции «Современные средства связи», Минск, 2020 г.* Минск; 2020:57-58.
9. Marple (Jr.) S.L. *Digital Spectral Analysis.* New York: Dover Publications, Inc.; 2019.

## References

1. [Primeneniye radiolokatsionnogo podpoverkhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoy geologii]. Pod red. M.I. Filkenshteyna. M.: Nedra; 1986. (In Russ)
2. [Voprosy podpoverkhnostnoy radiolokatsii]. Pod red. A.Yu. Grineva. M.: Radiotekhnika; 2005. (In Russ)
3. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Barton D.K. *Fundamentals of Short-Range FM Radar.* Horwood.: Artech House Publishers; 2003.
4. Daniels D.J. *Ground Penetrating Radar.* London: The Institution of Electrical Engineers; 2004.
5. Malevich I.Yu., Lopatchenko A.S. [Portativnyy LCHM radar podpoverkhnostnogo zondirovaniya]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2019;1(119):75-82. (In Russ)
6. Malevich I.Yu., Lopatchenko A.S., Shukevich T.V., Meledin K.I. [Priyemo-peredayushchiy trakt gomodinnogo tipa s kvadraturnymi kanalami dlya LCHM radara podpoverkhnostnogo zondirovaniya]. *Problemy infokommunikatsiy.* 2019;2(10):12-17. (In Russ)
7. Lopatchenko A.S., Malevich I.Yu., Savenko S.A. [LCHM-radiolokator podpoverkhnostnogo zondirovaniya s povyshennoy razreshayushchey sposobnostyu]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2015;3(89):43-48. (In Russ)
8. Bobkov, Yu.Yu., Malevich, I.Yu., Lopatchenko, A.S., Shukevich, T.V. [Antenna UVCH diapazona dlya radara podpoverkhnostnogo zondirovaniya]. *Materialy XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennyye sredstva svyazi", Minsk, 2020.* Minsk; 2020:57-58. (In Russ)
9. Marple (Jr.) S.L. *Digital Spectral Analysis.* New York: Dover Publications, Inc.; 2019.

### Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

### Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

**Малевич И.Ю.**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Помехозащищенность радиотехнических устройств и систем» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Лопатченко А.С.**, ассистент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Шукевич Т.В.**, заведующая научно-исследовательской лабораторией «Помехозащищенность радиотехнических устройств и систем» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### Information about the authors

**Malevich I.Yu.**, Dr. of Sci., Professor, Principal Research Scientist of the Research Laboratory “Noise Protection of RF Devices and Systems” of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Lopatchenko A.S.**, Assistant at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Shukevich T.V.**, Head of the Research Laboratory “Noise Protection of RF Devices and Systems” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
тел. +375-17-293-88-96;  
e-mail: malevich@bsuir.by  
Малевич Игорь Юрьевич

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-17-293-88-96;  
e-mail: malevich@bsuir.by  
Malevich Igor Yur'evich





<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-73-81>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 621.317.329+539.196:537

## ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЕПАРАЦИИ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ БАКТЕРИЙ (*S.AUREUS*) В ЦЕЛЬНОЙ КРОВИ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНЫМ БИОСЕНСОРНЫМ ЧИП-ФОРМАТОМ С ПРОЗРАЧНЫМИ МИКРОЭЛЕКТРОДАМИ

А.И. ДРАПЕЗА<sup>1</sup>, С.К. ЛАЗАРУК<sup>2</sup>, Г.А. СКОРОХОД<sup>3</sup>, В.А. ЛОБАН<sup>1</sup>, Т.И. ОРЕХОВСКАЯ<sup>2</sup>,  
А.И. ХМЕЛЬНИЦКИЙ<sup>1</sup>, Е.И. ГУДКОВА<sup>3</sup>, А.В. ДОЛБИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup>Белорусский государственный медицинский университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 29 марта 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Изучены электрокинетические возможности сепарации и концентрирования бактерий *S.aureus* в цельной крови человека (исследуемая смесь) с помощью новой конструкции четырехэлектродного биосенсорного чип-формата с прозрачными микроэлектродами. В исследованиях использована закрытая ячейка, в которую заливали исследуемую смесь. Электрокинетическое перемещение бактерий при концентрировании наблюдалось при подаче на первый и второй кольцевые внешние электроды переменного напряжения, а на третий и четвертый полукруглые центральные электроды – постоянного напряжения. Процесс сепарации эритроцитов и концентрирования бактерий фиксировался оптическим методом для модельных условий и в цельной крови. Показано, что концентрирование бактерий проявляется через 8 минут и увеличивается к 30 минуте в области центральных электродов в модельных условиях. Измерения были проведены на биосенсорных чип-форматах, имеющих практически одинаковые электрофизические параметры емкости и проводимости на частотах от 100 Гц до 1 МГц. Установлено, что амплитудно-частотный режим и биосенсорный чип-формат могут быть использованы для разработки методического обеспечения идентификации вида бактерий, но только оптическими методами. Показано, что для увеличения количества бактерий на центральных электродах в режиме концентрирования необходимо повысить скорость электроосмотического потока на переменном токе путем оптимизации состава среды и параметров электрического режима, чтобы уравнивать скорости процессов сепарации и концентрирования.

**Ключевые слова:** биосенсорный чип-формат, ИТО микроэлектроды, цельная кровь человека, эритроциты, бактерии *S.aureus*, сепарация, концентрирование, электрокинетический транспорт.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T20КИТГ-011 и Ф22КИ-050).

**Для цитирования.** Драпеза А.И., Лазарук С.К., Скороход Г.А., Лобан В.А., Ореховская Т.И., Хмельницкий А.И., Гудкова Е.И., Долбик А.В. Изучение электрокинетических возможностей сепарации и концентрирования бактерий (*S.aureus*) в цельной крови четырехэлектродным биосенсорным чип-форматом с прозрачными микроэлектродами. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 73-81.

## STUDY OF ELECTROKINETIC POSSIBILITIES OF BACTERIA (S.AUREUS) SEPARATION AND CONCENTRATION BY DEVELOPED FOUR- ELECTRODE BIOSENSOR CHIP FORMATS WITH ITO MICROELECTRODES IN WHOLE BLOOD

ALEXANDER I. DRAPEZA<sup>1</sup>, SERGEY K. LAZAROUK, GENADZI A. SKOROKHOD<sup>3</sup>,  
VALERY A. LOBAN<sup>1</sup>, TAISA I. OREKHOVSKAYA<sup>2</sup>, ALEXANDER I. KHMELNITSKY<sup>1</sup>,  
ELENA. I. GUDKOVA<sup>3</sup>, ALEXANDER V. DOLBIK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>3</sup>Belarusian State Medical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 29 March 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The electrokinetic possibilities of separation and concentration of *S.aureus* bacteria in human whole blood (test mixture) were studied using a new design of a four-electrode biosensor chip format with transparent microelectrodes. In the measurements, a closed cell was used, into which the test mixture was poured. The electrokinetic movement of bacteria during concentration was observed when AC voltage was applied to the first and second annular external electrodes, and DC voltage was applied to the third and fourth semicircular central electrodes. The process of separation of erythrocytes and concentration of bacteria was recorded by an optical method. It is shown that the concentration of bacteria appears after 8 minutes and increases by 30 minutes in the region of the central electrodes under model conditions. The measurements were carried out on two biosensor chip formats having almost identical electrophysical parameters of capacitance and conductivity at frequencies from 100 Hz to 1 MHz. It is determined that the amplitude-frequency mode and biosensor chip format can be used to develop methodological support for the identification of bacterial species, but only by optical methods. It is shown that in order to increase the number of bacteria on both of the central electrode in the concentration mode, it is necessary to increase the speed of the electroosmotic flow at alternating current, by optimizing the composition of the medium and the parameters of the electrical regime in order to equalize the rates of separation and concentration processes.

**Keywords:** biosensor chip format, ITO microelectrodes, human whole blood, erythrocytes, *S.aureus* bacteria, separation, concentration, electrokinetic transport.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** This work was supported by the Project No. T20KITG-011 and F22KI-050 of BRFFR.

**For citation.** Drapeza A.I., Lazaruk S.K., Skorokhod G.A., Loban B.A., Orekhovskaya T.I., Khmel'nitsky A.I., Gudkova E.I., Dolbik A.V. Study of Electrokinetic Possibilities of Bacteria (*S.aureus*) Separation and Concentration by Developed Four-electrode Biosensor Chip Formats with ITO Microelectrodes in Whole Blood. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 73-81.

### Введение

Для обнаружения и идентификации инфекционных агентов (ИА) в условиях сильной гетерогенности дисперсных фаз, например, в плазме цельной крови человека, существует достаточно большое разнообразие методов, которые часто используются для этих целей. Среди этих методов следует выделить следующие: метод проточной цитометрии [1], культуральный

метод<sup>1</sup>, оптический метод<sup>2</sup>, иммунологические методы<sup>3</sup>, молекулярно-генетические методы с использованием полимеразной цепной реакции (ПЦР) [2]. Все вышеотмеченные методы идентификации ИА являются трудоемкими и времязатратными. Необходимо упрощение методов, чтобы приблизить их к месту лечения в качестве экспресс-диагностических методов, например, типа у «постели больного» (с англ., «point of care») [3]. В настоящее время только метод тонкослойной хроматографии используется в качестве экспресс-диагностики. При этом интерпретация результатов по цвету окрашивания полосок достаточно субъективная, а использование в методе специфических реагентов (моноклональные антитела, коллоидное золото) делает его достаточно дорогим [4].

Анализ тенденций развития рассмотренных выше методов анализа ИА в современной микробиологии показывает, что их развитие идет по пути автоматизации, а также более широкого внедрения молекулярно-генетических и экспресс-диагностических методов исследования. Автоматизация позволяет значительно уменьшить время анализа и повысить точность идентификации, снизить трудоемкость ручных процессов, оптимизировать рутинные протоколы обмена и обработки информации, которые обусловлены значительным разнообразием существующих инфекционных агентов и величин объема их образцов, а также применением множества уточняющих тестов для отдельного образца при его идентификации, например, для традиционных (культуральных) методов.

Ранее авторами был разработан трехэлектродный биосенсорный чип-формат, предназначенный для электрокинетической сепарации и концентрирования ИА из суспензии с эритроцитами человека, для ускоренной идентификации которых могут быть использованы оптические методы, например, рамановская спектроскопия [5]. Данный подход является не менее перспективным направлением исследований и разработок с позиции простоты приготовления образцов, портативности, воспроизводимости результатов и получения достоверной информации по идентификации ИА (живых клеток) практически в режиме реального времени. Трехэлектродная конструкция практически не позволяет совместить электрофизические, например, импедансные, методы идентификации выделенных клеток с электрокинетическими процессами сепарации и концентрирования в силу ограниченности ее функциональных возможностей.

Предлагаемая четырехэлектродная конструкция имеет более широкие функциональные возможности управления градиентом поля для вынужденной поляризации клеток. Допускает гибкость при поиске режима совмещения за счет подбора напряжений, частоты и сепарационного буфера, обладающего низкой проводимостью и хорошим жидкостным контактом с металлом микроэлектродов при решении вопросов ускоренного обнаружения и идентификации ИА, например, при разработке методического обеспечения на основе цельной крови, дисперсная фаза и дисперсная среда которой являются гетерогенными.

Целью настоящей работы является изучение электрокинетических возможностей сепарации и концентрирования бактерий *S.aureus* в цельной крови четырехэлектродным биосенсорным чип-форматом с прозрачными микроэлектродами, позволяющим использовать оптические и/или импедансные методы измерения.

### Методика эксперимента

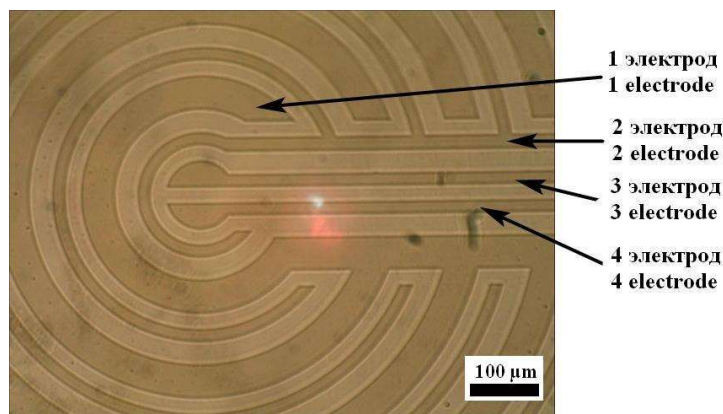
Исследования проводились на разработанных БГУИР совместно с БГУ лабораторных образцах биосенсорных четырехэлектродных чип-форматах. Топологический рисунок электродов разработанного чипа представлен на рис. 1. Первый электрод – внешний кольцевой широкий электрод. Второй электрод – внутренний кольцевой узкий электрод. Третий электрод – верхний центральный электрод. Четвертый электрод – нижний центральный электрод.

<sup>1</sup> Царев В.Н. *Микробиология, вирусология и иммунология*. М.: Практическая медицина; 2010.

<sup>2</sup> Литусов Н.В. *Бактериоскопические методы исследования*. Иллюстрированное учебное пособие. Екатеринбург: УГМУ; 2015.

<sup>3</sup> Шабан Ж.Г., Слизень В.В., Канашкова Т.А., Крылов И.А. *Методы исследования в микробиологии*. Учебно-методическое пособие. Минск: БГМУ; 2010.

Электроды формировали из прозрачно-проводящего оксида индия и олова (ИТО) толщиной 0,1 мкм на стеклянной подложке.



**Рис. 1.** Фотография фрагмента топологического рисунка прозрачных электродов в центральной области четырехэлектродного биосенсорного чип-формата

**Fig. 1.** Photograph of a fragment of the topological pattern of transparent electrodes in the central region of a four-electrode biosensor chip format

Для проведения электрокинетических исследований был приготовлен буферный раствор на основе изотонического буфера PBS (Phosphate Buffered Saline (1X, pH = 7,4)), электрическая проводимость которого была доведена до значения 1,0 мСм/см с помощью раствора глюкозы (~5 %), чтобы оптимизировать осмотическое давление экспериментального раствора для клеток крови.

Исследуемая гетерогенная дисперсная смесь состояла из суспензии эритроцитов, суспензии бактерий *S.aureus* и буферного раствора. Концентрация исходных суспензий бактерий и эритроцитов составляли  $10^6$  КОЕ/мл и  $10^6$  кл/мл соответственно.

В работе использованы эритроциты, выделенные из цельной крови человека, а также цельная кровь с антикоагулянтом ЭДТА (этилендиаминтетраацетат), бактерии *S.aureus*.

Электрокинетическое перемещение бактерий при концентрировании наблюдалось при подаче на первый и второй кольцевые внешние электроды переменного напряжения  $U_1^{p-p} = 6-10$  В и  $U_2^{p-p} = 4-6$  В (двойное амплитудное значение), а на третий и четвертый полукруглые центральные электроды – постоянного напряжения 0,5 В.

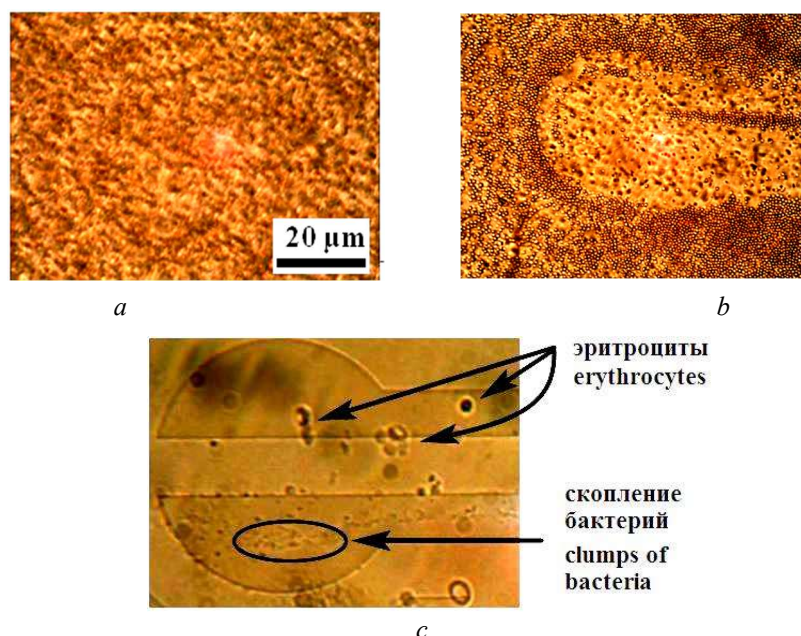
В исследованиях была использована экспериментальная установка, функциональные возможности и технические характеристики которой приведены в работе [6]. Калибровка оптической системы установки проводилась с использованием объективов 6,3X и 20X, микрометрического слайда ОМП (ГОСТ 7513-55 № 612781), минимальное деление калибровочной шкалы которого составляет 10 мкм, и программного обеспечения используемой в установке видеокамеры DSM-510 (Китай).

С помощью экспериментальной установки были получены видеоматериалы, характеризующие электрокинетический транспорт различных типов клеток в области металлизации топологического рисунка микроэлектродов, которые для последующего анализа конвертировались в формат «.jpeg» с помощью соответствующего редактора, например, Free Video to JPG Converter. Запись видеоматериалов в измерительной ячейке с помощью видеокамеры DSM-510 и объектива 20X осуществлялась в иммерсионном режиме работы объектива.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены результаты оптических исследований экспериментальной смеси, состоящей из суспензии эритроцитов, суспензии бактерий и буферного раствора в соотношении 1:1:1 на поверхности биосенсорного чипа. Электрокинетический процесс сепарации и концентрирования проходил при следующих электрических режимах на электродах:  $U_1^{p-p} = 6$  В,  $U_2^{p-p} = 4$  В,  $U_3^{пост} = 0,5$  В,  $U_4^{пост} = 0,5$  В, частота  $f = 801,4$  Гц. Приведенные на рис. 2 фотоматериалы получены во время одного эксперимента после 40 с, 15 и 25 мин.

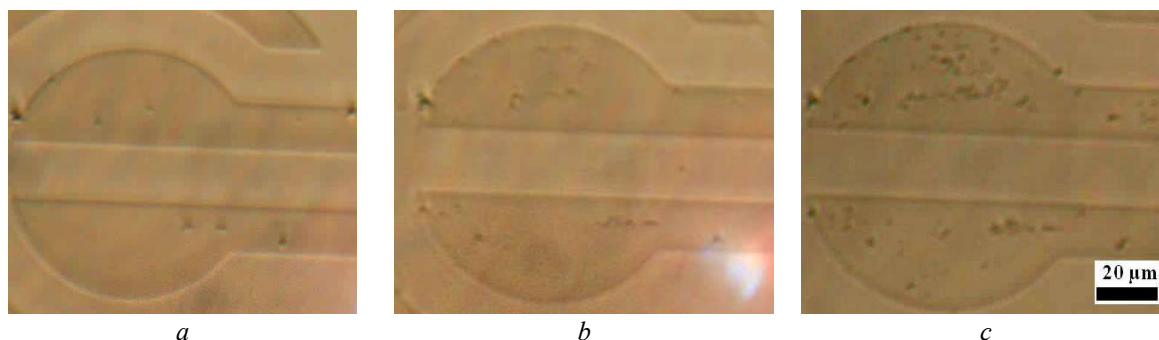
Из рис. 2, *a* видно, что после 40-й секунды протекания процесса электрокинетической сепарации на биосенсорном чипе начинают проявляться контуры электродов. После 15 минут эксперимента видно концентрирование эритроцитов за пределами центральных электродов (рис. 2, *b*). После 25 минут эксперимента (рис. 2, *c*) практически все эритроциты удаляются с поверхности центральных электродов. Лишь одиночные эритроциты видны на поверхности центральных электродов. Удаление эритроцитов с поверхности электродов делает заметными скопления бактерий, размер которых лежит в диапазоне 0,5 – 1,5 мкм (рис. 2, *c*).



**Рис. 2.** Фотографии поверхности центральных электродов, демонстрирующие сепарацию эритроцитов. Время протекания процесса: *a* – 40 с; *b* – 15 мин; *c* – 25 мин

**Fig. 2.** Photographs of the surface of the central electrodes demonstrating the separation of erythrocytes. Process time: *a* – 40 s; *b* – 15 min; *c* – 25 min

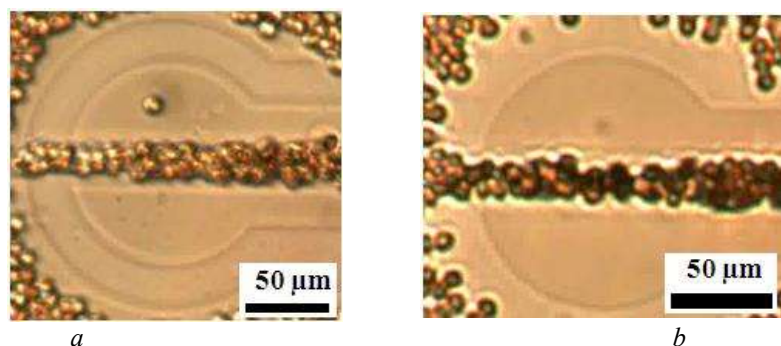
Чтобы более детально оценить эффект концентрирования бактерий *S.aureus* при вышеотмеченных электрических режимах, аналогичный эксперимент был проведен для экспериментальной смеси без суспензии эритроцитов. Исследуемый материал приготовили из суспензии бактерий *S.aureus* ( $10^6$  КОЕ/мл) и буферного раствора PBS в соотношении 1:1. На рис. 3 представлены результаты микроскопических исследований данной смеси после 1, 8 и 30-й минуты процесса концентрирования бактерий на поверхности биосенсорного чипа. Как видно на рис. 3, *a*, после 1-й минуты процесса наблюдаются первые признаки концентрирования бактерий. После 8-й минуты размеры бактериальных сгустков увеличиваются (рис. 3, *b*). На рис. 3, *c* концентрирование бактерий заметно на обоих центральных электродах, причем на верхнем центральном электроде сгусток бактерий более крупный по сравнению с нижним центральным электродом.



**Рис. 3.** Фотографии поверхности центральных электродов, демонстрирующие концентрирование бактерий *S.aureus*. Время протекания процесса: *a* –  $\approx 1,5$  мин; *b* – 15 мин; *c* – 25 мин

**Fig. 3.** Photographs of the surface of the central electrodes demonstrating the concentration of *S.aureus* bacteria. Process time: *a* –  $\approx 1.5$  min; *b* – 15 min; *c* – 25 min

Сепарация и концентрирование клеток цельной крови человека проводились после ее разведения в 5 % растворе глюкозы в соотношении 1:20 и добавлении антикоагулянта ЭДТА. Экспериментальную смесь готовили в соотношении 1:1:0,5 (суспензия разведенной крови с добавлением ЭДТА, суспензия бактерий *S.aureus* и буферный раствор PBS). Электрические режимы биосенсорных электродов:  $U_1^{pp} = 10$  В,  $U_2^{pp} = 6$  В,  $U_3 = U_4 = 0,5$  В,  $f = 3$  кГц. Микрофотографии поверхности двух биосенсорных чипов после 5 минут процесса сепарации представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Фотографии поверхности центральных электродов, демонстрирующих сепарацию эритроцитов цельной крови с антикоагулянтом ЭДТА и концентрирование бактерий *S.aureus* на двух различных чипах после 5 мин протекания исследуемых процессов

**Fig. 4.** Photos of the surface of the central electrodes demonstrating the separation of whole blood erythrocytes with the anticoagulant EDTA and the concentration of *S.aureus* bacteria on two different chips after 5 min of the studied processes

Из анализа микрофотографий двух чипов следует, что сепарация эритроцитов (удаление эритроцитов с поверхности 3 и 4 электродов) практически завершается после 5 минут на обоих чипах, что свидетельствует о воспроизводимости процесса. Если сравнить с результатами, представленными на рис. 2, то очевидно увеличение скорости удаления эритроцитов с поверхности центральных электродов. Это связано со значительным усилением конвективной (электроосмотической) составляющей электрокинетического процесса благодаря повышению амплитуды напряжения на первом и втором электродах  $U_1^{pp} = 10$  В,  $U_2^{pp} = 6$  В.

Как видно из рис. 4, в процессе сепарации полностью и достаточно широко освобождаются от эритроцитов обе половины центрального электрода, но зазор полностью и достаточно равномерно заполнен эритроцитами. Это связано с тем, что между двумя половинами центрального электрода разность потенциалов равна нулю.

На нижней половине центрального микроэлектрода чип-формата (рис. 4, *a*) видны темные пятна разного размера, что, скорее всего, и есть скопления бактерий. Следует отметить, что при таком подходе в составе среды экспериментального раствора все-таки присутствует часть плазмы цельной крови.

В реальном эксперименте чувствительность метода будет связана с определением присутствия бактерий в частично разведенной плазме цельной крови. Однако при выборе подхода и условий оценки чувствительности метода приходится прибегать к моделированию и с цельной кровью, т. е. добавлять в состав экспериментального раствора разбавленную суспензию бактерий извне. Результаты проведенных исследований показывают (рис. 3 *b, c*), что концентрирование бактерий в области обеих половин центрального электрода начинают заметно проявляться уже через 8,5 минут и заметно увеличиваются через 30 минут. И это в условиях отсутствия влияния концентрации эритроцитов на перемещение бактерий. А процесс сепарации и концентрирования, показанный на рис. 4, занимает по времени только 5 минут. Поэтому для ускорения перемещения бактерий к обеим половинам центрального электрода необходим подбор такого состава среды и параметров электрического режима, который бы позволил повысить скорость электроосмотического потока на переменном токе [7] и за счет этого уравнивать скорости процессов сепарации и концентрирования. Электрические параметры (емкость и проводимость) обоих чип-форматов, представленных на рис. 4, были измерены на частотах 1 МГц, 10 кГц, 1 кГц и 100 Гц.

Соответственно порядку указанных значений частот измеренные параметры емкости и проводимости имеют следующие величины:

– чип-формат *a* – (10,80 пФ-33,20 мкСм), (21,40 пФ-0,05 мкСм), (22,20 пФ-0,01мкСм), (23,50 пФ-0,005 мкСм),  
– чип-формат *b* – (10,70 пФ-33,40 мкСм), (21,40 пФ-0,05 мкСм), (22,30 пФ-0,01мкСм), (23,50 пФ-0,005 мкСм). Проведенные экспериментальные исследования показали, что уменьшение величины емкости на высоких частотах обусловлено в основном уменьшением величины монтажных емкостей подводящих дорожек.

Увеличение электрической проводимости исследуемого чипа обусловлено тем, что на частотах мегагерцового диапазона не все процессы успевают происходить с временной задержкой менее 1 мкс. Поэтому для разработанного биосенсорного чип-формата наиболее оптимальным является его эксплуатация в килогерцовом диапазоне частот, где эти показатели относительно стабильны. Также более оптимальными с точки зрения увеличения скорости сепарации и концентрирования клеток крови и бактерий является увеличение амплитудного напряжения на электродах биосенсорного чип-формата до  $U_1^{pp} = 10$  В,  $U_2^{pp} = 6$  В.

С точки зрения практического применения этот амплитудно-частотный режим может быть использован для разработки методического обеспечения идентификации вида бактерий, если проводить ее оптическими методами.

### Заключение

Проведено исследование электрокинетического процесса сепарации клеток в экспериментальной смеси, состоящей из суспензии крови, суспензии бактерий и буферного (изотонического) раствора, при помощи четырехэлектродного биосенсорного чип-формата. Показано, что разделение клеток крови и бактерий на поверхности центральных электродов происходит после 5–30 минут протекания электрокинетических процессов, вызываемых различным электрическим смещением на электродах. Предложен оптимизированный амплитудно-частотный режим для функционирования разработанного биосенсорного чип-формата. Отмечено, что для идентификации типов бактерий могут быть использованы только оптические методы.

### Список литературы

1. Гальцева И.В., Давыдова Ю.О., Капранов Н.М., Джулакян У.Л., Менделеева Л.П. Роль и место проточной цитометрии в диагностике и мониторинге минимальной остаточной болезни при множественной миеломе. *Онкогематология*. 2017;2:80-94. DOI: 10.17650/1818-8346-2017-12-2-80-94.
2. Антонова О.С., Рудницкая Г.Е., Тупик А.Н., Буляница А.Л., Евстапов А.А., Курочкин В.Е. Полимеразная цепная реакция: приборная и методическая реализация. Обзор аналитических характеристик. *Научное приборостроение*. 2011;21(4):5-21.
3. Афоничева П.К., Буляница А.Л., Евстапов А.А. «Орган-на-чипе» – материалы и методы изготовления (обзор). *Научное приборостроение*. 2019;29(4):3-18.
4. Feyzkhanova G., Voloshin S., Smoldovskaya O., Arefieva A., Filippova M., Barsky V., Pavlushkina L., Butvilovskaya V., Tikhonov A., Reznikov Y., Rubina A. Development of a microarray-based method for allergen-specific IgE and IgG4 detection. *Clinical proteomics*. 2017;14:1-13. DOI: 10.1186/s12014-016-9136-7.
5. Драпеза А.И., Лазарук С.К., Гудкова Е.И., Лобан В.А., Ореховская Т.И., Хмельницкий А.И., Скороход Г.А. Оптимизация состава среды и размеров конструктивных элементов биопроцессорного чипа-формата с NI микроэлектродами для разделения и концентрации *S.aureus* в модельных условиях и в цельной крови. *Сборник научных статей XII Международной научно-технической конференции «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии», Минск, 10 дек. 2020 г.* Минск: БГУИР; 2020:163-169.
6. Лобан В.А., Драпеза А.И., Ореховская Т.И., Хмельницкий А.И., Руденко Д.А., Скороход Г.А., Гудкова Е.И. Экспериментальная установка для электрокинетического управления разделением и концентрированием клеток на поверхности планарной конструкции микрочипа из микрокапли суспензий. *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов в 3 кн. Книга 2.* Минск: ФТИ НАН Беларуси; 2017:229-237.

7. Ореховская Т.И., Гудкова Е.И., Драпеца А.И., Лазарук С.К., Лобан В.А., Перко С.Л., Скороход Г.А., Хмельницкий А.И. Разработка и исследование биопроцессорного чип-формата на основе ИТО микроэлектродов для манипуляций разделением и концентрированием клеток в гетерогенных суспензиях. *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов*. Минск: ФТИ НАН Беларуси; 2019:67-74.

### References

1. Galtseva I.V., Davydova Y.O., Kapranov N.M., Julakyan U.L., Mendeleeva L.P. [The role and place of flow cytometry in the diagnosis and monitoring of minimal residual disease in multiple myeloma]. *Onkogematologiya*. 2017;2:80-94. DOI: 10.17650/1818-8346-2017-12-2-80-94. (In Russ.)
2. Antonova O.S., Rudnitskaya G.Ye., Tupik A.N., Bulyanitsa A.L., Yevstrapov A.A., Kurochkin V.Ye. [Polymerase chain reaction: instrument and methodical implementation. Overview of analytical characteristics]. *Nauchnoye priborostroenie*. 2011;21(4):5-21. (In Russ.)
3. Afonicheva P.K., Bulyanitsa A.L., Yevstrapov A.A. [«Organ-on-Chip» – materials and methods of manufacture (Review)]. *Nauchnoye priborostroenie*. 2019;29(4):3-18. (In Russ.)
4. Feyzkhanova G., Voloshin S., Smoldovskaya O., Arefieva A., Filippova M., Barsky V., Pavlushkina L., Butvilovskaya V., Tikhonov A., Reznikov Y., Rubina A. Development of a microarray-based method for allergen-specific IgE and IgG4 detection. *Clinical proteomics*. 2017;14:1-13. DOI: 10.1186/s12014-016-9136-7.
5. Драпеца А.И., Лазарук С.К., Гудкова Е.И., Лобан В.А., Ореховская Т.И., Хмельницкий А.И., Скороход Г.А. [Optimization of medium composition and sizes of design elements of bioprocessor chip format with Ni microelectrodes for separation and concentration of S.aureus under model conditions and in whole blood]. *Collection of scientific articles of the XII International Scientific and Technical Conference “Means of medical electronics and new medical technologies”, 10 Dec. 2020, Minsk, Belarus*. Minsk: BSUIR; 2020:163-169. (In Russ.)
6. Лобан В.А., Драпеца А.И., Ореховская Т.И., Хмельницкий А.И., Руденко Д.А., Скороход Г.А., Гудкова Е.И. [Experimental setup for electrokinetic control of cell division and concentration on the surface of a planar microchip design from a microdroplet of suspensions]. *Advanced methods and technologies of materials development and processing. Collection of scientific papers. Volume 2*. Minsk: FTI NAN Belarusi; 2017:229-237. (In Russ.)
7. Ореховская Т.И., Гудкова Е.И., Драпеца А.И., Лазарук С.К., Лобан В.А., Перко С.Л., Скороход Г.А., Хмельницкий А.И. [Development and research of a bioprocessor chip format based on ITO microelectrodes for manipulating the separation and concentration of cells in heterogeneous suspensions]. *Advanced methods and technologies of materials development and processing. Collection of scientific papers*. Minsk: FTI NAN Belarusi; 2019:67-74. (In Russ.)

### Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

### Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

**Драпеца А.И.**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ клеточной инженерии и нанобиотехнологий Белорусского государственного университета.

**Лазарук С.К.**, д.ф.-м.н., доцент, заведующий НИЛ 4.12 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### Information about the authors

**Drapeza A.I.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher at the Research Laboratory of Cellular Engineering and Nanobiotechnology of Belarusian State University.

**Lazarouk S.K.**, Dr. of Sci., Associate Professor, Head of Laboratory 4.12 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.



**Скореход Г.А.**, к.м.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ внутрибольничных инфекций Белорусского государственного медицинского университета.

**Лобан В.А.**, к.т.н., ведущий научный сотрудник НИЛ клеточной инженерии и нанобиотехнологий Белорусского государственного университета.

**Ореховская Т.И.**, ведущий инженер-технолог НИЛ 4.12 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Хмельницкий А.И.**, к.ф.-м.н., доцент кафедры биофизики Белорусского государственного университета.

**Гудкова Е.И.**, к.м.н., доцент, руководитель НИЧ Белорусского государственного медицинского университета.

**Долбик А.В.**, научный сотрудник НИЛ 4.12 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
tel. +375-17-293-88-69;  
e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by  
Лазарук Сергей Константинович

**Skorokhod G.A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher at the Research Laboratory of Nosocomial Infections of the Educational Institution of the Belarusian State Medical University.

**Loban V.A.**, Cand. of Sci., Leading Researcher at the Research Laboratory of Cellular Engineering and Nanobiotechnology of Belarusian State University.

**Orekhovskaya T.I.**, Advanced Technologist at Laboratory 4.12 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Khmelnitsky A.I.**, Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Biophysics of Belarusian State University.

**Gudkova E.I.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Research Part of the Belarusian State Medical University.

**Dolbik A.V.**, Researcher at Laboratory 4.12 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-17-293-88-69;  
e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by  
Lazarouk Serguei Konstantinovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-82-89>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.372.5

## СПОСОБ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ СИНТЕЗА КВАЗИДВУХПОЛОСОВЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

М.А. ЯНЦЕВИЧ., А.А. СВИРИДЕНКО

*Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь» (г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 5 апреля 2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы, связанные с возможностями аналитической методики синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств и способом ее совершенствования. Методика основана на математическом аппарате обобщенного метода Дарлингтона с применением на этапе выбора аппроксимирующей функции специального способа формирования квазидвухполосовых частотных характеристик. Представлено сопоставление результатов согласования нагрузки, полученных при помощи разработанной методики и прогрессивным численным методом синтеза. Проведенный анализ решенной задачи позволил произвести частную оценку возможностей предлагаемой аналитической методики согласования. Обозначено важное ограничивающее обстоятельство для методики синтеза – отсутствие решений для нагрузок повышенной сложности, что связано с малой вариативностью известных аппроксимирующих функций передачи мощности. В качестве решения проблемы рассматриваются ограниченно-плоские функции, отличающиеся от классических аппроксимаций расширенной вариативной способностью. Использование комбинации знаний о формировании квазидвухполосовых частотных характеристик и методики использования ограниченно-плоских функций позволило расширить диапазон согласуемых нагрузок. Представлено решение тестовой задачи согласования 5-элементной нагрузки, для которой использование классических аппроксимаций не приемлемо.

**Ключевые слова:** согласующая цепь, модель, квазидвухполосовая частотная характеристика, аппроксимация, ограниченно-плоская функция, методика, нагрузка, параметры, интегральная ошибка.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Янцевич М.А., Свириденко А.А. Способ совершенствования методики синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 82-89.

## A METHOD FOR IMPROVING THE TECHNIQUE FOR THE SYNTHESIS OF QUASI-TWO BANDPASS MATCHING DEVICES

MIKHAIL A. YANTSEVICH, ANATOLY A. SVIRIDENKO

*Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 5 April 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The article deals with issues related to the possibilities of the analytical technique for the synthesis of quasi-two-band matching devices and the way to improve it. The technique is based on the mathematical apparatus of the Generalized Darlington method with the use of a special method of forming quasi-two-band frequency characteristics at the stage of choosing an approximating function. A comparison of the results of load matching obtained using the developed methodology and a progressive numerical synthesis method is presented. The analysis of the solved problem allowed us to make a private assessment of the capabilities of the proposed analytical method of matching. An important limiting circumstance for the synthesis technique is indicated – the lack of solutions for loads of increased complexity, which is caused by a small variability of the known approximating power transfer functions. As a solution to the problem, boundedly flat functions are considered, which differ from classical approximations in their extended variability. The use of a combination of knowledge about the formation of quasi-two-band frequency characteristics and the technique of using limited-flat functions made it possible to expand the range of matched loads. A solution to the test problem of matching a 5-element load is presented, for which the use of classical approximations is not acceptable.

**Keywords:** matching circuit, model, quasi-two-band frequency response, approximation, boundedly flat function, technique, load, parameters, integral error.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Yantsevich M.A., Sviridenko A.A. A Method for Improving the Technique for the Synthesis of Quasi-two Bandpass Matching Devices. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 82-89.

### Введение

Одним из требований, предъявляемых к современным средствам связи, глобальным спутниковым системам позиционирования, является обеспечение их работы одновременно в нескольких частотных диапазонах. А это означает, что техническое исполнение таких систем предусматривает наличие в своем составе многоканальных приемо-передающих модулей. Неотъемлемой составляющей последних являются многополосные и квазидвухполосовые согласующие устройства.

Основная задача этих устройств – обеспечение максимального уровня передаваемой мощности между элементами приемо-передающего тракта в заданных частотных диапазонах. Поэтому качество согласования влияет на эффективность работы аппаратуры, в частности на такие характеристики, как дальность радиосвязи, помехозащищенность, пропускная способность радиоканала. Это обстоятельство сохраняет интерес к совершенствованию существующих методов их реализаций.

Как и в любой другой науке, предпочтительными являются аналитические методы, которые дают возможность перспективы в решении задач согласования, наиболее полную информацию для конструктора и позволяют глубже понять физику процесса согласования. Настоящая статья является продолжением [1] и преследует несколько целей. Одна из них – оценка возможностей аналитической методики [1] по отношению к прогрессивным численным методам синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств. Другая цель – согласование нагрузок, обусловленных квазидвухполосовой частотной характеристикой, имеющих более сложный характер сопротивления, чем у простых моделей, подобных низкочастотной  $RC$  цепи. Большинство таких нагрузок недоступны для аналитических методов синтеза. Причиной этому

является малое количество вариативных параметров классических аппроксимирующих функций (АФ) передачи мощности [2]. Ниже представлен возможный вариант решения указанной проблемы.

### Сопоставление результатов согласования

Эффективность аналитической методики [1] подтверждается примером согласования низкочастотной  $RC$  нагрузки. Полученная реализация согласующей цепи (СЦ) обеспечила более избирательную частотную характеристику в сравнении с другим аналитическим результатом согласования. Данный факт допускает мнение о значимой конкурентоспособности методики [1] в аналитической теории широкополосного согласования. Однако при решении подобных задач редко прибегают к аналитике, отдавая предпочтение более эффективной группе методов.

Численные методы согласования успешно решают задачи практически любой сложности, в том числе по реализации квазидвухполосных согласующих устройств. Отсюда интерес к оценке возможностей аналитической методики [1] при согласовании с ее помощью нагрузок, доступных численным методам.

Необходимо отметить, что методика [1] рассчитана на использование классических АФ, способных дать решения для многих относительно простых задач согласования. Рассмотрим одну из таких задач (рис. 1), решение которой представлено в диссертационных исследованиях Васильева<sup>1</sup>.

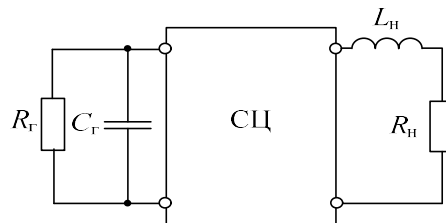


Рис. 1. Задача согласования комплексных нагрузок  
Fig. 1. The task of matching complex loads

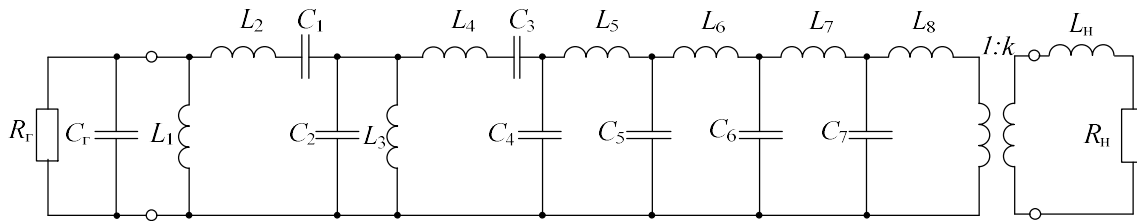
Параметры по условию задачи соответствуют:  $R_T = 1$ ,  $C_T = 0,5$ ,  $R_H = 5$ ,  $L_H = 1$ . Диапазоны частот:  $\omega_{\min 1} \dots \omega_{\max 1} = 1 \dots 2$  Гц,  $\omega_{\min 2} \dots \omega_{\max 2} = 5 \dots 6$  Гц. Как было установлено в [3], комплексный характер согласуемых сопротивлений вводит дополнительное ограничение на порядок АФ. Решение задачи возможно для четного порядка функции передачи мощности. Согласно обозначенного требования к порядку функции передачи примем в качестве исходной АФ Чебышева 4-го порядка:

$$K_p(\omega^2) = K / \left[ 1 + \varepsilon^2 (8 \cdot \omega'^4 - 8 \cdot \omega'^2 - 1)^2 \right],$$

где  $K \in (0; 1]$  – коэффициент уровня передачи мощности;  $\varepsilon \in (0; 1]$  – коэффициента пульсаций чебышевской АФ;  $\omega' = \left( (1,39^2 - \omega^2) \cdot (5,574^2 - \omega^2) \right) / \omega \cdot 27,994$  – квазидвухполосное частотное преобразование, полученное согласно [1].

В соответствии с методикой [1] решение получено при значениях параметров АФ  $\varepsilon = 0,124$ ,  $K = 1$ . Полученная в результате синтеза квазидвухполосная СЦ (рис. 2) формирует более избирательную частотную характеристику передачи мощности (рис. 3) в сравнении с известным результатом Васильева<sup>1</sup>. Необходимо отметить, что полученная схемная реализация отличается только наличием трансформатора и дополнительными тремя реактивными элементами.

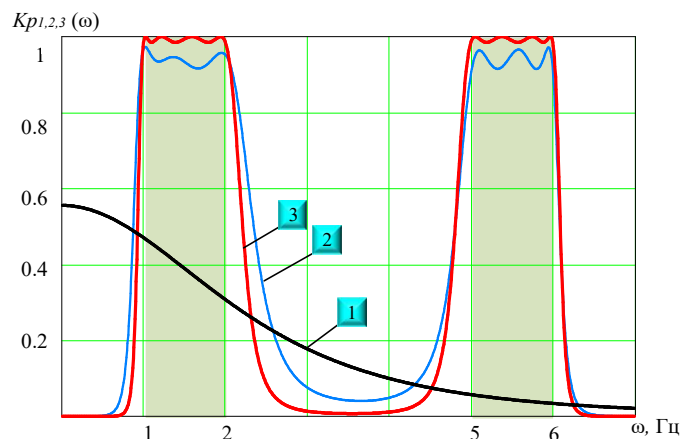
<sup>1</sup> Васильев Д.А. Структурно-параметрический синтез четырехполюсников при широкополосном согласовании и моделировании на основе аппарата Т-матриц : дис. ... к-та техн. наук : 05.12.04. – Минск, 2010: 121 л.



**Рис. 2.** Принципиальная схема СЦ с нагрузками  
**Fig. 2.** Schematic of the matching device with loads

Значения номиналов СЦ соответственно равны:  $L_1 = 0,527$ ,  $L_2 = 0,145$ ,  $C_1 = 0,749$ ,  $C_2 = 1,034$ ,  $L_3 = 0,308$ ,  $L_4 = 0,274$ ,  $C_3 = 0,529$ ,  $C_4 = 0,251$ ,  $L_5 = 0,5$ ,  $C_5 = 0,568$ ,  $L_6 = 0,0886$ ,  $C_6 = 1,646$ ,  $L_7 = 0,09746$ ,  $C_7 = 0,822$ ,  $L_8 = 0,041$ ,  $k = 6,024$ .

На рис. 3 представлено сопоставление частотных характеристик передачи мощности.

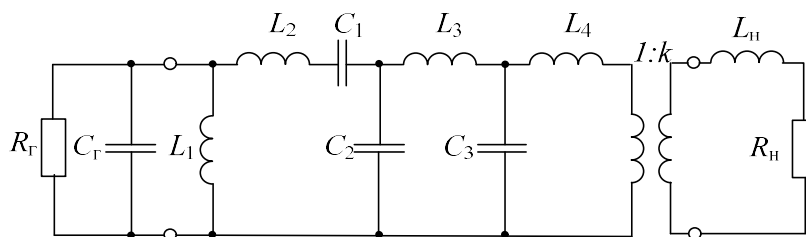


**Рис. 3.** Частотная характеристика передачи мощности соединенных нагрузок: 1 – без СЦ; 2 – с СЦ, реализованной Васильевым<sup>1</sup>; 3 – с СЦ, полученной при помощи методики [1]

**Fig. 3.** Power transmission frequency response connected loads: 1 – without a matching network; 2 – with matching network implemented by Vasiliev<sup>1</sup>; 3 – with matching network obtained using methodology [1]

Взяв за исходную АФ Чебышева 2-го порядка, решение данной задачи возможно с меньшим количеством элементов СЦ. Решение получено при значениях параметров функции передачи:  $\varepsilon = 0,24$ ,  $K = 1$ .

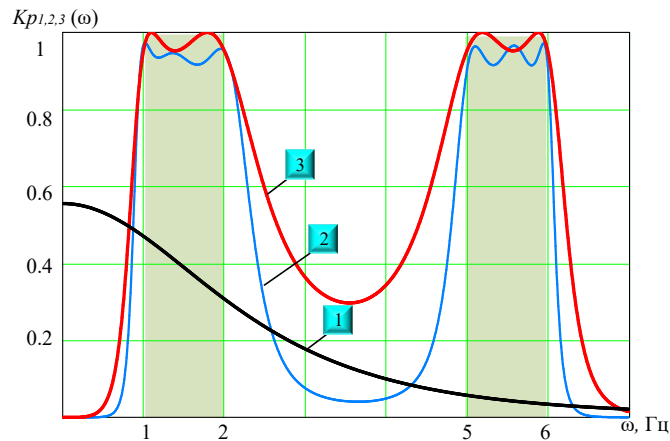
В результате синтеза СЦ, получаем следующую реализацию, приведенную на рис. 4.



**Рис. 4.** Принципиальная схема СЦ с нагрузками  
**Fig. 4.** Schematic of the matching device with loads

Значения номиналов СЦ соответственно равны:  $L_1 = 0,504$ ,  $L_2 = 0,146$ ,  $C_1 = 1,017$ ,  $C_2 = 0,783$ ,  $L_3 = 0,16$ ,  $C_3 = 0,525$ ,  $L_4 = 0,066$ ,  $k = 4,808$ .

Полученная схемная реализация меньше на пять реактивных элементов при наличии трансформатора в сравнении со схемой, предложенной в работе Васильева<sup>1</sup>. На рис. 5 показаны частотные характеристики передачи мощности.



**Рис. 5.** Частотная характеристика передачи мощности соединенных нагрузок: 1 – без СЦ; 2 – с СЦ, реализованной Васильевым<sup>1</sup>; 3 – с СЦ, полученной при помощи методики [1]

**Fig. 5.** Power Transmission Frequency Response connected loads: 1 – without a matching network; 2 – with matching network implemented by Vasiliev<sup>1</sup>; 3 – with matching network obtained using methodology [1]

Качество согласования по критерию максимума передачи мощности в обеих реализациях согласующих устройств не уступает результатам, полученным структурно-параметрическим методом. В этом можно убедиться при оценке интегральной ошибки в заданных частотных диапазонах (табл. 1).

Интегральная ошибка первой реализации (рис. 2) меньше на 5,345 и 5,193 % (для соответствующего частотного поддиапазона), чем у схемы Васильева<sup>1</sup>. Для второй реализации (рис. 4) эти значения равны 3,859 и 3,707 %. Представленные схемы имеют в своем составе такой элемент, как трансформатор, который в большинстве случаев можно исключить при помощи преобразования Нортон.

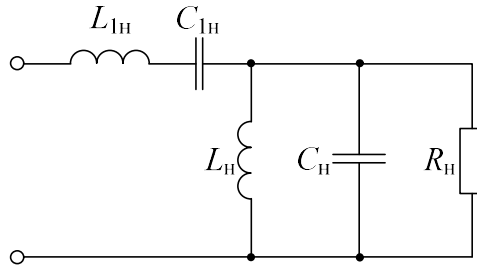
**Таблица 1.** Оценка уровня передаваемой мощности по интегральному критерию  
**Table 1.** Estimation of the power level transmitted by the integral criterion

Реализация Realization	Количество реактивных элементов СЦ Number of reactive elements of the matching network	Интегральная ошибка в различных частотных диапазонах Integral error in different frequency ranges	
		$1 - \int_1^2 K_{2,3}(\omega)$	$1 - \int_5^6 K_{2,3}(\omega)$
Васильева <sup>1</sup>	12	0,061	0,059
Согласно методике [1]	рис. 2	0,007468	0,0074683
	рис. 4	0,02233	0,0223294

### Синтез квазидвухполосовых СЦ с использованием ограниченно-плоских АФ

Обеспечение оптимальных характеристик моделируемых радиотехнических устройств, как правило, связано с увеличением требований к их конструкции. Вместе с тем речь идет о повышении сложности моделей сопротивлений этих устройств. Применение классических АФ в аналитической теории широкополосного согласования позволяет находить решение для относительно простых по структуре моделей сопротивлений (различные комбинации двух и трехэлементных *RLC* цепей) с ограниченным диапазоном значений собственных параметров. Для более сложных конструкций нагрузок аналитические решения имеют частный характер или вовсе отсутствуют. АФ с расширенным вариативным потенциалом и методика ее использования в [2] позволяет значительно увеличить диапазон согласуемых нагрузок. Предлагается использовать знание о принципах формирования квазидвухполосовых частотных характеристик [1] применительно к методике синтеза [2], основанной на использовании ограниченно-плоских АФ.

На рис. 6 представлен распространенный эквивалент нагрузки, характер сопротивления которого может соответствовать различным радиотехническим устройствам [4–5].



**Рис. 6.** Эквивалентная схема нагрузки  
**Fig. 6.** Equivalent scheme load

Зададим следующие значения параметров нагрузки:

$$R_r = 1, R_n = 5, C_n = 1, L_n = 10, C_{n1} = 1,4, L_{n1} = 3.$$

Диапазоны частот:

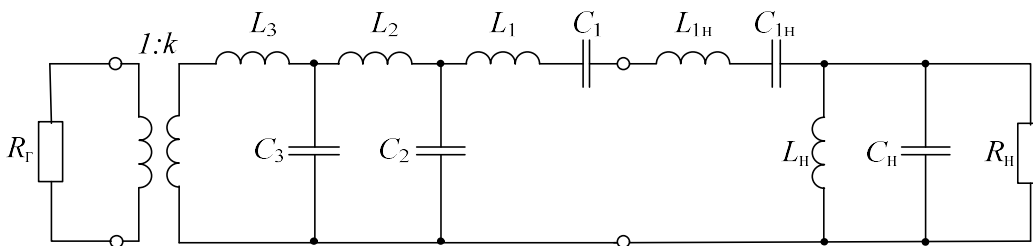
$$\omega_{\min 1} \dots \omega_{\max 1} = 0,2 \dots 0,3 \text{ Гц}, \quad \omega_{\min 2} \dots \omega_{\max 2} = 0,9 \dots 1 \text{ Гц}.$$

Согласование предлагаемой нагрузки с использованием классических АФ (Баттерворта, Чебышева) не представляется возможным ввиду их ограниченной параметрической способности. Предлагается использовать для согласования данной нагрузки квазидвухполосовую ограниченно-плоскую АФ 2-го порядка, конструкция которой соответствует следующему выражению:

$$K_p(\omega^2) = K / \left[ 1 + \frac{\varepsilon^2}{v_1 + v_2} (v_1 \cdot \omega'^2 + v_2 \cdot \omega'^4) \right],$$

где  $v_1, v_2$  – варьируемые параметры;  $\omega' = \left( (0,243^2 - \omega^2) \cdot (0,954^2 - \omega^2) \right) / 0,084 \cdot \omega$  – квазидвухполосовое частотное преобразование, полученное согласно [1].

Руководствуясь алгоритмом синтеза, описанного в [2], получаем решение задачи при значениях параметров функции передачи:  $\varepsilon = 0,4$ ,  $K = 0,992$ ,  $v_1 = 0,185$ ,  $v_2 = 2,794$ . В результате синтеза по функции выходного сопротивления получаем следующую реализацию СЦ, представленную на рис. 7.

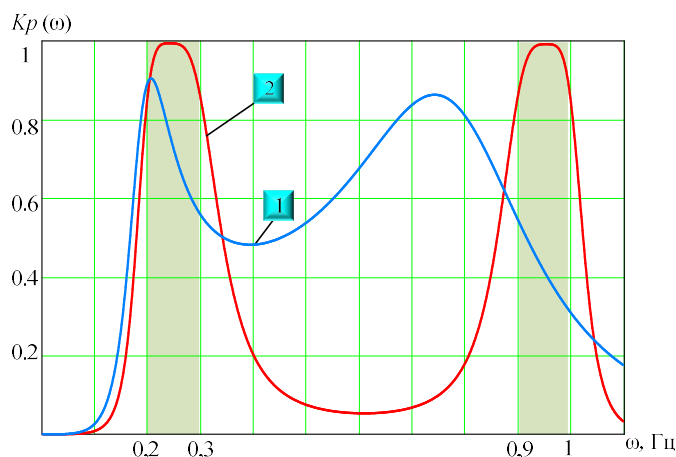


**Рис. 7.** Принципиальная схема СЦ с нагрузкой  
**Fig. 7.** Schematic of the matching device with load

Значения номиналов СЦ соответственно равны:  $L_1 = 0,221$ ,  $C_1 = 2,283$ ,  $C_2 = 1,639$ ,  $L_2 = 4,26$ ,  $C_3 = 0,722$ ,  $L_3 = 2,434$ ,  $k = 0,802$ .

На рис. 8 представлены частотные характеристики передачи мощности.

Полученный результат согласования можно улучшить за счет увеличения порядка аппроксимации. Указанный пример носит демонстративный характер и приведен в доказательство параметрического преимущества ограниченно-плоской АФ в сравнении с классическими аппроксимациями.



**Рис. 8.** Частотная характеристика передачи мощности нагрузки: 1 – без СЦ; 2 – с СЦ  
**Fig. 8.** Power transmission frequency response load: 1 – without a matching network; 2 – with matching network

### Заклучение

Впервые представлено аналитическое решение задачи согласования с обеспечением квазидвухполосовой частотной характеристики, в которой комплексный характер сопротивления имеет не только нагрузка, но и источник сигналов. При этом полученное согласующее устройство обеспечивает по ряду параметров лучший результат, нежели реализация численного метода. Данный факт свидетельствует о значимой конкурентоспособности предлагаемой в [1] аналитической методики синтеза. Другим важным результатом исследования, направленного на расширение диапазона согласуемых нагрузок, является комбинация знаний, выраженная в использовании квазидвухполосовых ограниченно-плоских АФ. Представленное решение тестовой задачи согласования 5-элементной модели не исчерпывает возможности предлагаемой аналитической концепции для более сложных конструкций нагрузок и определенно указывает на ее перспективы.

### Список литературы

1. Янцевич М.А., Филиппович Г.А Методика синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств. *Доклады БГУИР*. 2020;2:71-79. DOI:10.35596/1729-7648-2020-18-2-77-79.
2. Янцевич М.А., Филиппович Г.А Методика синтеза широкополосных согласующих устройств с использованием ограниченно-плоских аппроксимирующих функций. *Известия ГТУ*. 2021;129:154-158.
3. Филиппович Г.А. *Широкополосное согласование сопротивлений*. Минск: Военная академия Республики Беларусь; 2004.
4. Caytan O., Bogaert L., Haolin Li, Van Kerrebrouck J., Lemey S., Agneessens S., Bauwelinck J., Demeester P., Torfs G., Vande Ginste D., and Rogier H. Compact and wideband transmit opto-antenna for radio frequency over fiber. *Optics Express*. 2019;27:8395-8414. DOI: 10.1364/OE.27.008395.
5. Ghorbani A. , Raed A. Abd-Alhameed, Neil J. McEwan, Zhou D. An Approach for Calculating the Limiting Bandwidth-Reflection Coefficient Product for Microstrip Patch Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2006;54(4):1328-1331. DOI: 10.1109/TAP.2006.872641.

### References

1. Yantsevich M.A., Filippovich G.A. [The metod of synthesis of quasi-dual-band matching device]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020;2:71-79. (In Russ.)
2. Yantsevich M.A., Filippovich G.A. [Technique for the synthesis of quasi-two-band matching devices]. *Izvestiia Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny = Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. 2021;129:154-158. (In Russ.)
3. Filippovich G.A. [*Broadband impedance matching*]. Minsk: Military Academy of the Republic of Belarus; 2004. (In Russ.)



4. Caytan O., Bogaert L., Haolin Li, Van Kerrebrouck J., Lemey S., Agneessens S., Bauwelinck J., Demeester P., Torfs G., Vande Ginste D., and Rogier H. Compact and wideband transmit opto-antenna for radio frequency over fiber. *Optics Express*. 2019;27:8395-8414. DOI: 10.1364/OE.27.008395.
5. Ghorbani A., Raed A. Abd-Alhameed, Neil J. McEwan, Zhou D. An Approach for Calculating the Limiting Bandwidth-Reflection Coefficient Product for Microstrip Patch Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2006;54(4):1328-1331. DOI: 10.1109/TAP.2006.872641.

### Вклад авторов

Янцевич М.А. синтезировал согласующие цепи, провел сопоставление результатов согласования, определил способ совершенствования разработанной методики.

Свириденко А.А. принимал участие в интерпретации полученных результатов.

### Authors' contribution

Yantsevich M.A. synthesized matching circuits, compared the results of matching, determined a way to improve the developed methodology.

Sviridenko A.A. participated in the interpretation of the obtained results.

### Сведения об авторах

**Янцевич М.А.**, старший инженер кафедры автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

**Свириденко А.А.**, к.т.н., слушатель факультета Генерального штаба Военной академии Республики Беларусь.

### Information about the authors

**Yantsevich M.A.**, Senior Engineer at the Department of Automation, Radar and Transceivers of the Military Academy of the Republic of Belarus.

**Sviridenko A.A.**, Cand. of Sci., Student at the Faculty of the General Staff of the Military Academy of the Republic of Belarus.

### Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр. Независимости, 220,  
Военная академия Республики Беларусь;  
тел. +375-29-850-31-71;  
e-mail: yantsevich1052500@mail.ru  
Янцевич Михаил Александрович

### Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,  
Minsk, Independence Ave., 220,  
Military Academy of the Republic of Belarus  
tel. +375-29-850-31-71;  
e-mail: yantsevich1052500@mail.ru  
Yantsevich Mikhail Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-90-98>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.311.001.57

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СХЕМОТЕХНИКИ АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АККУМУЛЯТОРНО-ЕМКОСТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

В.П. ВАСИЛЕВИЧ, М.Е. ЗБЫШИНСКАЯ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 18 мая 2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Цель настоящей работы – исследование структуры и схемотехнических решений автономной фотоэлектрической установки с аккумуляторно-емкостным накопителем энергии для обеспечения стабильности напряжения в условиях импульсного характера нагрузки и переменного характера генерируемой солнечной панелью мощности. Предложена оригинальная активная схема управления гибридным накопителем. Пиковая мощность солнечной панели составила 100 Вт. Аккумуляторная часть накопителя энергии была представлена гелевой свинцово-кислотной 12 В батареей с зарядной емкостью 11 А·ч, а емкостная часть состояла из батареи суперконденсаторов с электростатической емкостью 80 Ф, рабочим напряжением 15,5 В. В качестве нагрузки при стационарном разряде накопителя служил реостат сопротивлением 12 Ом, а импульсный характер разряда имитировался с помощью автомобильного воздушного компрессора. Выполнен анализ вариантов схемотехнических решений, реализующих процесс зарядки емкостной части накопителя энергии от солнечной панели напрямую или через шунтовой DC/DC преобразователь. Заряд и разряд аккумуляторной части накопителя управлялся контроллером ProStar-15. В обоих случаях использовались буферные режимы заряда аккумуляторной и емкостной частей накопителя энергии. Результаты исследований определили пути повышения стабильности выходного напряжения в условиях импульсной нагрузки и переменного характера генерации электроэнергии при увеличении ресурса дорогостоящей аккумуляторной батареи.

**Ключевые слова:** автономная фотоэлектрическая установка, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, суперконденсатор, гибридный накопитель электроэнергии, контроллер заряда и разряда.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Василевич В.П., Збышинская М.Е. Особенности структуры и схемотехники автономной фотоэлектрической установки с аккумуляторно-емкостным накопителем энергии. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 90-98.

## STRUCTURE AND CIRCUIT ENGINEERING FEATURES OF STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH A BATTERY-CAPACITIVE ENERGY STORAGE DEVICE

VLADIMIR P. VASILEVICH, MARIYA Y. ZBYSHYNSKAYA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 18 May 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The purpose of this research is to analyze the structure and circuit design of stand-alone photovoltaic system with a battery-capacitive energy storage device to ensure voltage stability under peak voltage and a variable nature of the power generated by a solar panel. There is an original active control scheme for a hybrid drive. The peak power of the solar panel was 100 W. The battery part of the energy storage device was represented by a 12 V gel lead-acid battery with a charging capacity of 11 Ah, and the capacitive part consisted of a battery of supercapacitors with an electrostatic capacity of 80 F, an operating voltage of 15.5 V. A rheostat was used as a load during a stationary discharge of the storage device with a resistance of 12 Ohm, and the pulsed nature of the discharge was simulated using an automobile air compressor. The analysis of circuit design variants that implement the charging process the capacitive part of the energy storage device from a solar panel directly or with a shunt DC/DC converter is performed. Charging and discharging of the battery part was controlled by the ProStar-15 controller. In both cases, charging buffer modes the battery and capacitive parts of the energy storage device were used. The research results have identified ways to increase the stability of the output voltage under peak voltage and the variable nature of electricity generation conditions while increasing the resource of an expensive battery.

**Keywords:** stand-alone photovoltaic system, solar battery, storage battery, supercapacitor, hybrid energy storage device, charge and discharge controller.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Vasilevich V.P., Zbyshinskaya M.Y. Structure and Circuit Engineering Features of Stand-alone Photovoltaic System with a Battery-capacitive Energy Storage Device. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 90-98.

### Введение

Электроэнергия, вырабатываемая автономными фотоэлектрическими системами (АФЭС), имеет большой потенциал для удовлетворения текущих и будущих потребностей в электроэнергии как для запускаемых в околоземное пространство космических аппаратов, так и для мобильных устройств наземного базирования. Мощность АФЭС находится в пределах 0,1...1000 кВт, при этом АФЭС мощностью от 0,1 до 10 кВт условно относят к маломощным, от 10 до 100 кВт – средней мощности, выше 100 кВт – автономным системам энергообеспечения большой мощности. Например, международная космическая станция (МКС), является на настоящий момент крупнейшим и наиболее сложным международным космическим проектом в истории. Энергообеспечение МКС осуществляется АФЭС посредством массива солнечных модулей суммарной мощностью 256 кВт. Так как доступность солнечной энергии и в космосе и в земных условиях является непостоянной величиной, все АФЭС оснащаются накопителями энергии [1–10].

Устройства накопления электроэнергии можно разделить на три основные категории: аккумуляторные батареи (АБ), суперконденсаторы (СК) и их гибридную модификацию АБ+СК. АБ хранят энергию в виде химических реагентов, тогда как СК хранят энергию непосредственно в виде электрического заряда. Из-за этого принципиального различия между категориями они имеют разные выходные параметры энергии и мощности, циклируемости заряда-разряда и временные рамки зарядно-разрядных процессов, что требует применения специальных управляющих АФЭС электронных схмотехнических устройств.

Как показывают многочисленные исследования [4, 11–15], АБ способны запасать больше энергии на единицу массы, чем СК, вследствие использования электрохимических реакций, которые также называют фарадеевскими процессами. Данные процессы ответственны за перенос заряда через границу между электродами АБ и раствором электролита, приводят к окислительно-восстановительным реакциям на границах раздела. При заряде или разряде окислительно-восстановительные реакции изменяют молекулярную или кристаллическую структуру материалов электродов, что зачастую влияет на стабильность их работы и приводит к необходимости замены батареи после нескольких тысяч циклов заряда-разряда.

С другой стороны, у СК нет существенных изменений в свойствах материалов электродов в процессе эксплуатации, поэтому их можно заряжать и разряжать миллионы раз. Электростатические процессы накопления и отдачи заряда, используемые в СК, протекают намного быстрее, чем фарадеевские процессы в АБ, поэтому хотя СК имеют более низкую плотность энергии, чем АБ, они имеют более высокую плотность мощности. Кроме того, скорость их работы сильно различается: СК могут заряжаться и разряжаться за секунды, тогда как для зарядки высокоэффективных аккумуляторных батарей требуется более десятков минут, а для разрядки – часы или дни. Это привело к различным приложениям и возможностям в зависимости от требований к производительности. В действительности некоторые важные приложения требуют совместного использования АБ и ЭК. Однако производительность и управляемость современных накопителей энергии пока еще не соответствует требованиям эффективного использования электроэнергии. Например, устройства с более высокой плотностью энергии и мощности, более быстрой скоростью перезарядки и более длительным циклом зарядки-разрядки необходимы в качестве замены автомобилей с жидкотопливным двигателем на гибридные автомобили и электромобили.

Задача настоящих исследований состоит в том, чтобы на основе анализа структуры и схемотехники, использования компонентов современной управляющей и силовой электроники обозначить предпосылки создания надежных интеллектуальных АФЭС с гибридными аккумуляторно-емкостными накопителями энергии.

### Методика проведения эксперимента

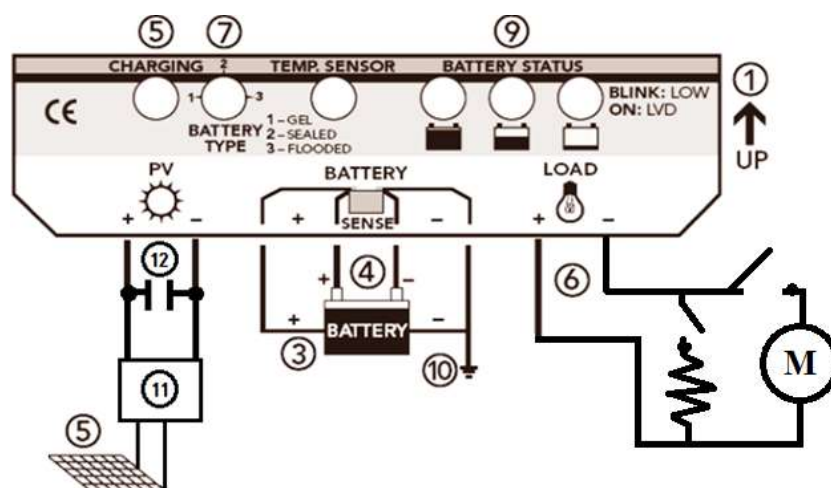
Исследователи схемотехнических вариантов исполнения выделяют три основных типа систем гибридных накопителей энергии [5]:

- пассивная схема, представляющая собой параллельное соединение аккумулятора и суперконденсатора с непосредственным подключением к нагрузке;
- полуактивная схема в виде параллельного соединения аккумулятора и суперконденсатора с использованием одного DC/DC преобразователя;
- активная схема, в которой для соединения аккумулятора и суперконденсаторного блока с нагрузкой используется несколько DC/DC преобразователей.

В более ранней работе [11] авторами исследовалась пассивная схема гибридного накопителя. От этого варианта пришлось отказаться из-за неуправляемого характера обмена энергией и инверсии токов в контуре параллельного соединения аккумуляторной и емкостной частей накопителя с непосредственным подключением к нагрузке.

В настоящей работе использовалась экспериментальная автономная фотоэлектрическая установка, упрощенная структурная схема которой приведена на рис. 1.

Солнечная панель мощностью 100 Вт состояла из двух модулей MC-50, соединенных параллельно. Ток короткого замыкания панели был равен 6,4 А, напряжение холостого хода – 17 В. Аккумуляторная часть накопителя энергии была представлена гелевой свинцово-кислотной 12 В батареей с зарядной емкостью 11 А·ч, а емкостная часть состояла из блока суперконденсаторов с электростатической емкостью 80 Ф, номинальным напряжением 15,5 В. В качестве регулятора заряда и разряда АБ использовался 12 В контроллер ProStar-15 с функцией ШИМ-модуляции зарядного тока. В качестве нагрузки при стационарном разряде накопителя служил реостат сопротивлением 12 Ом, а импульсный характер разряда имитировался с помощью подключения в качестве нагрузки автомобильного воздушного компрессора.



1 – цоколь контроллера ProStar-15; 2 – допустимая сила тока – 15 А; 3 Battery – подключение АБ 12 В, 11 А·ч; 4 – “Sense” – подключение датчика температуры АБ; 5 – подключение солнечной батареи, подключение регулятора заряда СК, подключение СК; 6 – подключение нагрузки; 7 – установка типа АБ; 8 – автоматическое определение напряжения сети 12 В/24 В; 9 – индикатор степени заряда АБ; 10 – заземление; 11 – шунтовой регулятор заряда СК; 12 – СК

**Рис. 1.** Структурная активная схема автономной фотоэлектрической установки с гибридным аккумуляторно-емкостным накопителем электроэнергии

**Fig. 1.** Structural-active circuit of stand-alone photovoltaic system with a hybrid battery-capacitive energy storage device

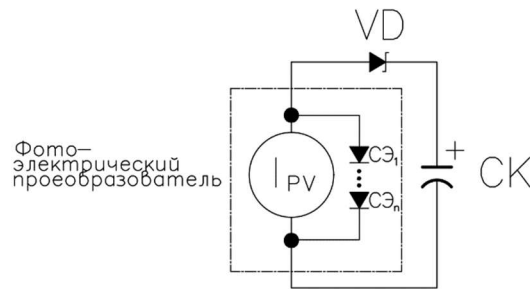
Экспериментальная установка позволяла моделировать различные варианты коммутации элементов схемы, а проверка работоспособности вариантов осуществлялась системой индикации и диагностики контроллера ProStar-15. Для защиты солнечной панели и накопителей энергии от токов обратной полярности использовались блокирующие диоды Шоттки, имеющие максимальное падение напряжения в прямом включении не более 0,5 В при прямом токе 10 А. Узловыми моментами работоспособности схемы являлись необходимость отсутствия разряда АБ через разряженный СК, представляющий собой короткозамкнутую нагрузку, отработка установленного алгоритма заряда АБ и обеспечение буферных режимов заряда суперконденсаторной и аккумуляторной частей гибридного накопителя энергии при подключении одного или нескольких потребителей энергии.

Буферный режим заряда СК и АБ выполнял функции обеспечения энергоснабжения нагрузки при прерывистом поступлении энергии для заряда накопителя и обеспечения необходимого количества энергии при неравномерном потреблении ее нагрузкой. Временной приоритет заряда в гибридном накопителе был отдан его суперконденсаторной части, т. е. вначале от солнечной батареи заряжался СК, а затем при достижении напряжения на нем, превышающего напряжение АБ, осуществлялся управляемый контроллером заряд аккумулятора. Управление зарядом СК осуществлялось с помощью разработанного шунтового регулятора (поз. 11 на рис. 1.).

### Результаты и их обсуждение

Выполнен анализ структурных и схемотехнических решений, реализующих процесс зарядки емкостного накопителя энергии. Для источника энергии разряженный СК представляет собой короткозамкнутую нагрузку. Кстати, фотоэлектрические преобразователи могут работать на нулевое сопротивление, а значит, способны заряжать СК с нуля.

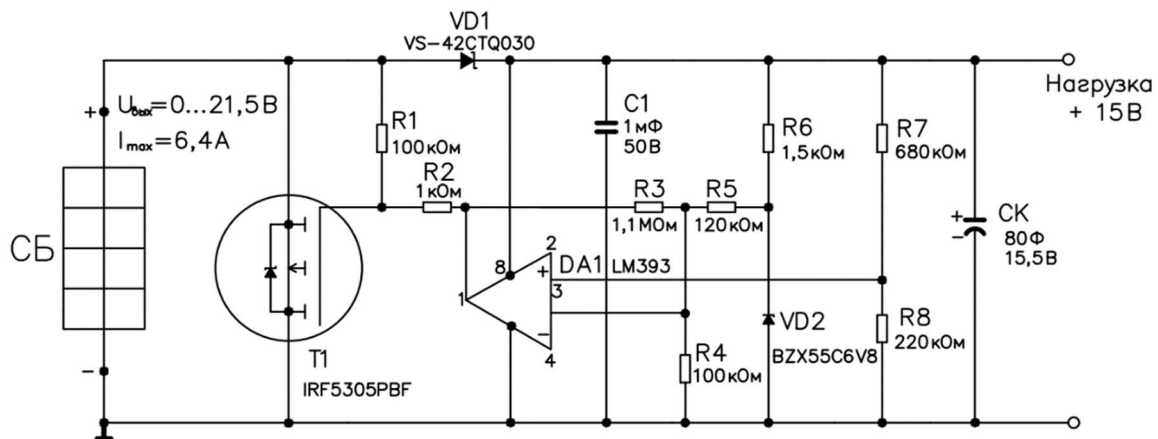
На рис. 2 приведена схема простого и наиболее эффективного зарядного устройства, применимого, однако, только в тех случаях, когда напряжение холостого хода солнечной батареи не выходит за границы, допустимые для СК. Диод Шоттки предохраняет СК от разряда через солнечную батарею в темное время суток.



**Рис. 2.** Схема заряда СК напрямую от солнечной батареи  
**Fig. 2.** Supercapacitor charging scheme directly from the solar panel

В изображенной на рис. 2 схеме в начальный момент напряжение на СК равно 0 В, вследствие чего фотоэлектрический преобразователь закорочен и выдает максимально возможный ток. По мере заряда СК ток уменьшается в соответствии с вольт-амперной характеристикой фотоэлектрического преобразователя.

Если напряжение холостого хода солнечной батареи превышает рабочее напряжение СК, для его защиты авторами разработана схема шунтового регулятора напряжения (рис. 3). Шунтовой (параллельный) регулятор выбран, как наиболее энергосберегающий способ понижения напряжения солнечной батареи для защиты СК от перегрузки по току. После того как СК зарядился, энергия солнечной батареи перераспределяется контроллером между зарядом АБ и нагрузкой, а ее избыток регулятор просто рассеивает в виде тепла.

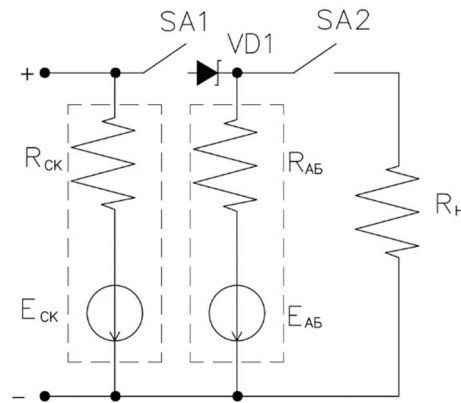


**Рис. 3.** Разработанная схема шунтового (параллельного) регулятора заряда СК  
**Fig. 3.** The developed circuit of the shunt (parallel) supercapacitor charge controller

В схеме, приведенной на рис. 3, использована микросхема компаратора LM393 и источник опорного напряжения, образованный резистивным делителем. Микросхема имеет открытый сток на выходе при выключенном регуляторе, представляющим собой обрыв. Диод Шоттки VS-42CTQD30 выбран из-за низкого значения падения на нем прямого напряжения. При превышении напряжения, вырабатываемого солнечной батареей, уровня 15 В с делителя на затвор транзистора T1 поступает потенциал, транзистор открывается, шунтируя ток, поступающий в нагрузку, в результате чего напряжение на суперконденсаторе не превышает требуемого значения 15 В. VD 2 BZX55C6V8 стабилитрон имеет номинальное напряжение стабилизации 6,8 В, ток стабилизации 5 мА, мощность рассеяния 0,5 Вт.

Как показано в более ранней работе [11], для СК емкостью 80 Ф при рабочем напряжении 15,5 В при отсутствии подзарядки характерно наличие саморазряда в виде спада напряжения на 0,25 В в сутки при нулевом значении этого показателя у АБ. Это говорит о том, что в составе гибридного аккумуляторно-емкостного накопителя суперконденсатор должен иметь значительную емкость для создания запаса энергии и находиться в состоянии постоянной подзарядки, т. е. работать в буферном режиме, который реализуется в схемах, приведенных на рис. 2, 3.

Исследована структурная схема (рис. 4) и особенности работы буферного режима зарядки АБ от СК. Важной особенностью этого режима является то, что выходное напряжение суперконденсатора задается на 0,05–2,50 В больше максимального напряжения для заряженного аккумулятора, а значение этого напряжения будет зависеть от конкретного типа аккумулятора, причем надо учитывать, что оптимальное напряжение несколько меняется при изменении температуры аккумулятора.



$E_{СК}$  – ЭДС СК;  $R_{СК}$  – внутреннее сопротивление СК;  $E_{АБ}$  – ЭДС АБ;  $R_{АБ}$  – внутреннее сопротивление АБ;  $R_{Н}$  – сопротивление нагрузки; SA1, SA2 – выключатели; VD1 – диод Шоттки

**Рис. 4.** Эквивалентная схема буферного режима зарядки аккумулятора от суперконденсатора  
**Fig. 4.** Buffer mode Equivalent circuit of charging battery from supercapacitor

При отключенной нагрузке процесс заряда следующий: ЭДС зарядного устройства  $E_{СК}$  выше ЭДС аккумулятора  $E_{АБ}$  и направлена встречно напряжению аккумулятора. Сумма падений напряжения в контуре заряда равна алгебраической сумме ЭДС этого контура. Таким образом, ток заряда зависит от разности ЭДС зарядного устройства  $E_{СК}$  и от общего сопротивления цепи, которое состоит из внутренних сопротивлений СК и АБ: 
$$I_3 = \frac{E_{СК} - E_{АБ}}{R_{СК} - R_{АБ}} .$$

Внутренние сопротивления  $R_{СК}$  и  $R_{АБ}$  можно считать практически постоянными. Таким образом, значение зарядного тока будет зависеть от разности ЭДС  $E_{СК}$  и  $E_{АБ}$ . Вследствие того, что внутренние сопротивления малы по значению, если АБ разряжена, то ток заряда может стать больше допустимого для конкретной АБ или зарядного устройства. Следовательно, контроллер заряда АБ обычно выполняется по схеме с ограничением максимального тока и применяется для аккумуляторов определенного типа и емкости. По мере зарядного процесса аккумулятора разница ЭДС, а соответственно, и ток заряда будут уменьшаться. Поэтому зарядный процесс АБ будет замедляться независимо от мощности, которую в это время способна выдавать солнечная батарея.

Если рассматривать режим разряда аккумулятора без зарядного тока, то данный режим, согласно рис. 4, будет работать, когда выключатель SA1 разомкнут, а выключатель SA2 замкнут. Ток разряда в таком случае зависит от ЭДС аккумулятора и суммы внутреннего и внешнего сопротивления и определяется по формуле 
$$I_p = \frac{E_{АБ}}{R_{СК} - R_{АБ}} .$$

Напряжение на выводах аккумулятора будет равно ЭДС аккумулятора минус падение напряжения на его внутреннем сопротивлении 
$$U = E_{АБ} - R_{АБ} I_H .$$

Ток через нагрузку и ток через внутреннее сопротивление одинаковый. Внутреннее сопротивление аккумулятора небольшое по значению, и ток в основном зависит от величины сопротивления нагрузки. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше потребляемый ток и величина падения на внутреннем сопротивлении и меньше напряжение на выводах аккумулятора.

Далее был рассмотрен режим одновременного заряда АБ от СК и его разряда через нагрузку, когда замкнуты контакты SA1 и SA2. Естественно, что если во время заряда АБ подключили нагрузку, которая потребляет меньший по сравнению с зарядным ток, то ток заряда

уменьшится на величину тока в нагрузке. При уменьшении сопротивления нагрузки и увеличении потребляемого тока зарядный ток АБ уменьшается и при некотором значении прекратится. Потребляемый от СК ток увеличивается, что приведет к некоторому падению напряжения до величины ЭДС АБ. Контроллер заряда АБ способен автоматически отключать нагрузку при снижении напряжения ниже допустимого уровня.

### Заключение

Для решения задачи обеспечения стабильности напряжения в условиях импульсного характера нагрузки и переменного характера генерируемой солнечной панелью мощности исследована структура и схемотехнические решения автономной фотоэлектрической установки с гибридным аккумуляторно-емкостным накопителем энергии. Предложена оригинальная активная схема управления гибридным накопителем. От правильной настройки и режима использования оборудования, управляющего зарядом и разрядом накопителя зависит производительность всей системы, надежность и срок службы установки. Выполнен анализ вариантов схемотехнических решений, реализующих процесс зарядки емкостной части накопителя энергии от солнечной панели напрямую или через разработанный шунтовой DC/DC преобразователь. В обоих случаях использовались буферные режимы заряда аккумуляторной и емкостной частей накопителя энергии, выполняющих функции обеспечения энергоснабжения системы при прерывистом поступлении энергии для заряда аккумуляторной и емкостной частей накопителя и обеспечения необходимого количества энергии при неравномерном потреблении энергии нагрузкой. Результаты исследований определили пути повышения стабильности выходного напряжения в условиях импульсной нагрузки и переменного характера генерации электроэнергии при увеличении ресурса дорогостоящей аккумуляторной батареи.

### Список литературы

1. Обухов С.Г., Плотников И.А., Ибрагим А., Масолов В.Г. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(1):64-76. DOI: 10.18799/24131830/2020/1.
2. Красовский В.И., Яцко П.В. Накопители энергии для улучшения режимов работы электрической энергосистемы с возобновляемыми источниками энергии. *ЭБ БГУ: технические и прикладные науки. Сахаровские чтения 2020 г.: экологические проблемы XXI века, г. Минск, Республика Беларусь, Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета*. 2020:393-396. DOI: 10.46646/SAKH-2020-2-393-396.
3. Бердников Р.Н., Фортов В.Е., Сон Э.Е., Деньщиков К.К., Жук К.Э., Новиков Н.Л., Шакарян Ю.Г. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов. *Инновационные технологии и материалы. Новые технические средства. Энергия единой сети*. 2013;2(7):40-51.
4. Карабанов С.М., Мороз А.И., Суворов Д.В., Сливкин Е.В., Гололобов Г.П., Тарабрин Д.Ю. Автономные солнечные энергетические системы с использованием суперконденсаторов. *Вестник РГРТУ*. 2015;54(Ч. 2):137-142.
5. Марьенков С.А. Гибридный накопитель электрической энергии для сетей с распределенной генерацией на основе возобновляемых источников электрической энергии. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;2(56, Ч. 3):120-123. DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.007.
6. Саврасов Ф.В. Варианты построения автономных систем электроснабжения с использованием фотоэлектрических устройств и алгоритмы их работы. *Науковедение*. 2013;6:1-13.
7. Носкин Г.В., Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А. Гибридный накопитель электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и блоков суперконденсаторов для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов. *Лесной вестник*. 2019;23(4):39-48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48.
8. Хаванов Е.С., Бесчастный Р.А., Фатеев Д.А. Использование блоков суперконденсаторов в системе электроснабжения возвращаемого аппарата пилотируемого транспортного корабля. *Космическая техника и технологии*. 2020;2(29):84-91. DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-2-84-91.



9. Носкин Г.В., Хаванов Е. С., Савельев В. В. Унифицированный резервный накопитель электрической энергии для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов. *Известия РАН. Энергетика*. 2019;5:20-25. DOI: 10.1134/S000233101905008X.
10. Шиняков Ю.А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*. 2007;1(12);123-129. DOI: 10.18287/2541-7533-2007-0-1(12)-123-129.
11. Василевич В.П., Збышинская М.Е. Зарядно-разрядные характеристики аккумуляторно-емкостного накопителя электроэнергии в составе автономной фотоэлектрической системы. *Доклады БГУИР*. 2022;20(2):78-85. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-2-78-85
12. Weingarth D., Foelske-Schmitz A., Kötz R. Cycle versus voltage hold: which is the better stability test for electrochemical double layer capacitors? *J. Power Sources*. 2012;225:84-88. DOI: 10.1016/j.powsour.2012.10.019.
13. Kötz R., Sauter J.C., Ruch P., Dietrich P., Büchi F.N., Magne P.A., Varenne P. Voltage balancing: long-term experience with the 250 V supercapacitor module of the hybrid fuel cell vehicle HY-LIGHT. *J Power Sources*. 2007;174:264-271. DOI: 10.1016/j.powsour.2007.08.078.
14. Diab Y., Venet P., Gualous H., Rojat G. Self-discharge characterization and modeling of electrochemical capacitor used for power electronics applications. *IEEE Trans Power Electron*. 2009;24:511-517. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2007116.
15. Lazzari M., Soavi F., Mastragostino M. Dynamic pulse power and energy of ionic-liquid-based supercapacitor for HEV application. *J. Electrochem Soc*. 2009;156: A661-A666. DOI: 10.1149/1.3139046.

### References

1. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Ibrahim A., Masolov V.G. Dual Energy Storage for Hybrid Energy Systems with Renewable Energy Sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(1):64-76. DOI: 10.18799/24131830/2020/1. (InRuss.)
2. Krasovski V.I., Yacko P.V. Energy storage as devices for improving the operation of the electric power system with renewable energy sources ed technical and applied sciences. *Sakharov readings 2020: environmental problems of the XXI century. Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk*. 2020:393-396. DOI: 10.46646/SAKH-2020-2-393-396. (InRuss.)
3. Berdnikov R.N., Fortov V.E., Son E.E., Den'shchikov K.K., Zhuk K.E., Novikov N.L., Shkaryan Yu.G. Hybrid electric power storage for ENES based on Li-ion batteries and supercapacitors Energy of Unified Grid. *Scientific and Technical Journal*. 2013;2(7):40-51. (InRuss.)
4. Karabanov S.M., Moroz A.I., Suvorov D.V., Slivkin Y.V., Gololobov G.P., Tarabrin D.Y. Stand-alone photovoltaic systems with supercapacitors. *Vestnik of RSREU*. 2015;54(P. 2):137-142. (InRuss.)
5. Marenkov S.A. Hybrid accumulator of electricity for networks with distributed generation based on renewable sources of electrical energy. *International Research Journal*. 2017;2(56, P. 3):120-123. DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.007. (InRuss.)
6. Savrasov F.V. Variants of the autonomous power supply systems's design with photovoltaic devices and algorithms for their work. *Naukovedenie*. 2013;6:1-13. (InRuss.)
7. Noskin G.V., Khavanov E.S., Beschastnyy R.A. [Hybrid electric power storage based on lithium-ion batteries and supercapacitors blocks for power supply system of Earth return spacecraft]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2019;23(4):39-48. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48. (InRuss.)
8. Khavanov E.S., Beschastny R.A., Fateev D.A. Using Super-capacitors Units in the Power Supply System of Re-entry Vehicle of a Crew Transportation Spacecraft. *Kosmicheskaya tekhnika iologii*. 2020;2(29):84-91. DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-2-84-91. (InRuss.)
9. Noskin G. V., Khavanov, E. S., Savelyev V. V. Unified Reserve Electric Power Storage for Power Supply Systems of Returning Spacecrafts. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2019;5:20-25. DOI: 10.1134/S000233101905008X. (InRuss.)
10. Shinyakov Yu. A. Extremal regulation of automatic space vehicle solar battery power. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2007;1(12):123-129. DOI: 10.18287/2541-7533-2007-0-1(12)-123-129. (InRuss.)
11. Vasilevich V.P., Zbyshinskaya M.Y. Charging and discharging characteristics of a battery capacitive energy storage device for stand-alone photovoltaic system. *Doklady BGUIR*. 2022;20(2):78-85. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-2-78-85
12. Weingarth D., Foelske-Schmitz A., Kötz R. Cycle versus voltage hold: which is the better stability test for electrochemical double layer capacitors? *J. Power Sources*. 2012;225:84-88. DOI: 10.1016/j.powsour.2012.10.019.
13. Kötz R., Sauter J.C., Ruch P., Dietrich P., Büchi F.N., Magne P.A., Varenne P. Voltage balancing: long-term experience with the 250 V supercapacitor module of the hybrid fuel cell vehicle HY-LIGHT. *J. Power Sources*. 2007;174:264-271. DOI: 10.1016/j.powsour.2007.08.078.

14. Diab Y., Venet P., Gualous H., Rojat G. Self-discharge characterization and modeling of electrochemical capacitor used for power electronics applications. *IEEE Trans Power Electron.* 2009;24:511-517. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2007116.
15. Lazzari M., Soavi F., Mastragostino M. Dynamic pulse power and energy of ionic-liquid-based supercapacitor for HEV application. *J. Electrochem Soc.* 2009;156: A661-A666. DOI: 10.1149/1.3139046.

### Вклад авторов

Василевич В.П. осуществил постановку задачи для проведения исследования, разработал схему лабораторного стенда, принимал участие в подготовке рукописи статьи.

Збышинская М.Е. выполнила снятие и анализ характеристик, подготовила рукопись статьи.

### Authors' contribution

Vasilevich V.P. carried out the formulation of the problem for the study, developed the scheme of the laboratory stand, took part in the preparation of the article manuscript.

Zbyshinskaya M.Y. carried out the experiments and analysis, prepared article manuscript.

### Сведения об авторах

**Василевич В.П.**, к.т.н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Збышинская М.Е.**, аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

**Vasivevich V.P.**, Cand. of Sci., Professor at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Zbyshinskaya M.Y.**, Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
tel. +375-29-310-33-12;  
e-mail: 10mash@mail.ru  
Збышинская Мария Евгеньевна

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-29-310-33-12;  
e-mail: 10mash@mail.ru  
Zbyshinskaya Mariya Yevgen'evna

## ПРИЛОЖЕНИЕ

В статью «Refined Analysis of the Correlation Between the Accepted Maximum Permissible Levels of Radio Frequency» автора V.I. Mordachev, опубликованную в Т. 20, № 1, 2022 г. журнала «Доклады БГУИР» (с. 55–64), были внесены изменения. В связи с этим табл. 2 статьи необходимо читать в следующей редакции.

**Table 2.** The results of the analysis of correlation between the severity of the hygienic restriction on the RF EMF MPL for population in different countries and the mortality rate from COVID-19 according to the official WHO data, determined in relation to the country's population

Country	MPL W/m <sup>2</sup>	The ratio of the total number of deaths from COVID-19 to the specified date <sup>2)</sup> , to the total country population <sup>3)</sup> , in millions							
		05/18/20	07/19/20	09/18/20	11/18/20	01/19/21	03/19/21	05/18/21	07/20/21
1. Azerbaijan	0.1	3.85	34.4	56.3	99.1	298	327	473	493
2. Belarus	0.1	17.5	52.4	81.6	112	168	225	287	353
3. Belgium	10	781	846	857	1280	1766	1952	2133	2175
4. Bulgaria <sup>1)</sup>	0.01	15.8	43.0	107	347	1233	1701	2496	2616
5. Canada	4	151	234	244	292	477	598	661	702
6. Chile <sup>1)</sup>	0.1	23.5	442	635	779	918	1150	1461	1807
7. China	0.4	3.23	3.23	3.30	3.30	3.34	3.37	3.38	3.90
8. Denmark	10	94.4	105	110	133	312	414	432	439
9. France	10	430	460	474	704	1077	1397	1640	1693
10. Germany	10	94.7	108	112	157	568	887	1031	1091
11. Hungary	0.1	47.8	61.7	69.3	350	1193	1847	3031	3108
12. India	0.9	2.19	19.4	61.1	94.9	111	115	202	300
13. Ireland	10	312	355	362	404	530	925	1001	1016
14. Israel	0.9	31.3	45.6	134	316	466	701	738	745
15. Italy	0.1	528	580	590	768	1365	1718	2058	2115
16. Japan	10	5.92	7.79	11.7	15.1	36.0	69.2	91.6	119
17. Kazakhstan	0.1	1.81	20.0	106	126	157	187	263	435
18. Lithuania	0.1	20.6	29.4	32.0	110	916	1268	1516	1618
19. Luxemburg	0.45	171	177	198	377	890	1126	1291	1312
20. Netherlands	10	331	358	365	502	762	945	1019	1038
21. Poland	0.1	24.4	42.8	59.5	287	890	1290	1900	1987
22. Portugal	10	119	165	185	348	885	1642	1668	1688
23. Russia	0.1	18.5	84.1	131	234	454	642	794	1021
24. Spain	10	591	608	650	872	1135	1557	1699	1735
25. Sweden	10	364	556	581	616	1022	1311	1414	1450
26. Switzerland	0.1	185	195	204	380	930	1090	1170	1192
27. Turkey	0.56	49.1	64.9	86.7	139	286	353	533	600
28. UK	10	510	667	614	777	1324	1855	1881	1896
29. Ukraine	0.1	12.7	35.2	82.3	240	499	700	1150	1251
30. USA	10	263	416	591	741	1186	1610	1754	1824
31. Uzbekistan	0.025	0.359	2.51	12.5	17.9	18.5	18.6	20.1	24.1
Pearson's correlation coefficient:		0.60	0.570	0.522	0.442	0.289	0.315	0.137	0.1

<sup>1)</sup> The lower limit of the range of normalized values.  
<sup>2)</sup> The number of detected lethalties is given in accordance with the data of the Johns Hopkins Center for Health Security (<https://covid19.who.int/>).  
<sup>3)</sup> The population of countries is given as of 05/04/2020 in accordance with the data of the electronic resource <https://www.worldometers.info/world-population/>.

На сайте журнала в № 1, 2022 г. размещена актуальная версия статьи.

