

# ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

*Научно-производственный журнал*

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

<i>Медведев М. А., Чайковский В. М.</i> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПЕРЧАТКА РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ	5
<i>Григорьев А. В., Юрков Н. К., Ескибаев Е. Т., Избасов А. Г., Байсеитов М. Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЛОЖНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	11
<i>Зинченко Т. О.</i> СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ	22
<i>Полтавский А. В., Григорьев А. В., Мельничук А. И., Избасов А. Г., Рыбаков И. М.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ	28
<i>Реута Н. С.</i> ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВИБРОНАГРУЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕТКИ	39
<i>Нефедьев А. И., Трофимов А. А., Самофалов И. В.</i> УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧИСЛА ВИТКОВ КАТУШЕК ТРАНСФОРМАТОРОВ	53
<i>Захаров А. В., Либкинд И. В., Трофимов В. Ю., Шахмейстер Л. Е.</i> ВРЕМЯИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В АВТОНОМНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	59
<i>Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Коваль Н. С., Трофимов А. А., Григорьев А. В.</i> МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА	70

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

*Кирюшкина Е. В., Кострикина И. А.*

МЕТОДИКА ОТЗЫВА НЕДОБРОКАЧЕСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ  
С ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО РЫНКА

77

## ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Григорьев А. О., Лобов Д. С.*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УШНОГО  
ПУЛЬСОКСИМЕТРА В ТЕЛЕМЕДИЦИНЕ

84

*Батяев А. С., Бодин О. Н., Чыонг Тхи Лан Нхи, Крамм М. Н., Бодин А. Ю.*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ  
В СИСТЕМЕ РЕГИСТРАЦИИ МНОЖЕСТВЕННЫХ  
ОТВЕДЕНИЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

89

*Иванов А. Д., Тычков А. Ю., Чернышов Д. С.,*

*Тверская С. Ю., Золотарев Р. В., Яковлев М. С.*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОГРАММНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ МНОГООСЕВОЙ ПЛАТФОРМОЙ  
ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИМИТАЦИЕЙ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ И ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

97

*Сержантова Н. А.*

ОБЗОР МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ФИБРОЗА МИОКАРДА

104

*Алимурадов А. К.*

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ  
СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ  
ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА  
ПО РЕЧЕВЫМ СИГНАЛАМ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

116

# MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

*Scientific-production journal*

№ 2, 2023

## CONTENT

### INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

<i>Medvedev M.A., Chaykovsky V.M.</i> INTELLIGENT GESTURE RECOGNITION GLOVE	5
<i>Grigoriev A.V., Yurkov N.K., Eskibaev E.T., Izbasov A.G., Baiseitov M.N.</i> STUDY OF SIGNAL INTEGRITY WHEN MEASURING ELECTRICAL PARAMETERS IN COMPLEX ELECTRONICS SYSTEMS	11
<i>Zinchenko T.O.</i> STRUCTURE OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT CONTROL SYSTEM FOR THE SYNTHESIS OF TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES	22
<i>Poltavsky A.V., Grigoriev A.V., Melnichuk A.I., Izbasov A.G., Rybakov I.M.</i> OPTIMIZATION OF MODELS OF OBJECTS OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF MOBILE ROBOTS	28
<i>Reuta N.S.</i> INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF VIBRATION-LOADED OBJECTS BASED ON THE ANALYSIS OF THE IMAGE BLUR OF THE MARK	39
<i>Nefediev A.I., Trofimov A.A., Samofalov I.V.</i> DEVICES FOR MEASURING THE NUMBER OF TRANSFORMER COILS	53
<i>Zakharov A.V., Libkind I.V., Trofimov V.Yu., Shakhmeister L.E.</i> TIME-PULSE CONVERTERS IN AUTONOMOUS INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS	59
<i>Bezborodova O.E., Bodin O.N., Koval N.S., Trofimov A.A., Grigoriev A.V.</i> METROLOGICAL ANALYSIS OF THE MEASURING CHANNEL OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR DETERMINING THE ENVIRONMENTAL WELL-BEING OF HUMANS	70

## DEVICES AND METHODS OF MEASURING

*Kiryushkina E.V., Kostrikina I.A.*

PRODUCT REVIEW METHODOLOGY  
FROM THE PHARMACEUTICAL MARKET

77

## MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

*Grigoriev A.O., Lobov D.S.*

PROSPECTS FOR APPLICATION OF EAR PULSE  
OXIMETER IN TELEMEDICINE

84

*Batyaev A.S., Bodin O.N., Truong Thi Lan Nhi, Kramm M.N., Bodin A.Yu.*

PROVISION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY  
IN THE REGISTRATION SYSTEM OF MULTIPLE  
ELECTROCARDIAC SIGNAL LEADS

89

*Ivanov A.D., Tychkov A.Yu., Chernyshov D.S.,*

*Tverskaya S.Yu., Zolotarev R.V., Yakovlev M.S.*

INTELLIGENT SOFTWARE CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-AXIS  
VIRTUAL REALITY PLATFORM WITH SIMULATED  
ENVIRONMENTAL IMPACT AND FEEDBACK

97

*Serzhantova N.A.*

DIAGNOSTIC METHODS FOR MYOCARDIAL FIBROSIS

104

*Alimuradov A.K.*

SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF A SYSTEM  
TO DETECT AND CLASSIFY HUMAN EMOTIONAL  
STATES FROM SPEECH SIGNALS

116

# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

## INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 004.58

doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-1

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПЕРЧАТКА РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ

М. А. Медведев<sup>1</sup>, В. М. Чайковский<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> rtech@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Руки используются во всех сферах повседневной жизни, от простых задач, таких как подбор предмета, до сложных, таких как общение между собой людей с дефектами речи и слуха. Поэтому нужно найти способ не только отслеживать движения и жесты человеческих рук, но и интегрировать их, а распознавание жестов особенно важно для людей, использующих руки для общения. *Материалы и методы.* Предложена методика организации общения людей слабослышащих и с дефектами речи, включающая использование роботизированной перчатки, позволяющая в дальнейшем использовать данное предложение в случае, когда стандартный язык жестов будет исчерпан и потребуются его дополнение. *Результаты.* Проработана схема соединения промышленно изготовленных плат: Bluetooth модуль HC-05 и отладочной платы Arduino Nano совместно с черновым, упрощенным вариантом макета роботизированной кисти человека с закрепленными тензорезистивными датчиками. *Выводы.* Предлагаемый прием совместно с технологией роботизированных перчаток позволяет осуществить общение не только между людьми с дефектами речи и слуха, а также исключить недопонимание при общении людей с нарушением речи и слуха с обычными, здоровыми гражданами.

**Ключевые слова:** рука, перчатка, жесты, слабослышащие, дефект речи

**Для цитирования:** Медведев М. А., Чайковский В. М. Интеллектуальная перчатка распознавания жестов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 5–10. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-1

### INTELLIGENT GESTURE RECOGNITION GLOVE

M.A. Medvedev<sup>1</sup>, V.M. Chaykovsky<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> rtech@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* hands are used in all areas of everyday life, from simple tasks, such as the selection of an object, to complex ones, such as communication between people with speech and hearing defects. Therefore, it is necessary to find a way not only to track the movements and gestures of human hands, but also to integrate them, and gesture recognition is especially important for people who use their hands to communicate. *Materials and methods.* A method of organizing communication between people with hearing loss and speech defects is proposed, including the use of a robotic glove, which allows, in the future, to use this proposal for when the standard sign language is exhausted and its addition is required. *Results.* The connection scheme of industrially manufactured boards has been worked out: the HC-05 Bluetooth module and the Arduino Nano debugging board together with a rough, simplified version of the human robotic brush layout with fixed strain-resistant sensors. *Conclusions.* The proposed technique, together with the technology of robotic

gloves, allows communication not only between people with speech and hearing defects, but also eliminates misunderstandings when communicating people with speech and hearing impairments with ordinary, healthy citizens.

**Keywords:** hand, glove, gestures, hearing impaired, speech defect

**For citation:** Medvedev M.A., Chaykovsky V.M. Intelligent gesture recognition glove. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):5–10. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-1

### Введение

Общение – важная часть взаимодействия между людьми. Человек лучше всего понимает собеседника через речь. Но в мире живет большое количество людей с отсутствием слуха, которое препятствует развитию речи (речевого аппарата). Разработка умных перчаток для рук поможет преодолеть глухонемым людям коммуникационный барьер.

Цель данного устройства заключается в создании наиболее простого в реализации и использовании аппарата, способного прийти на помощь к человеку с ограниченными возможностями в коммуникации с людьми.

### Аппаратные компоненты

Умная перчатка была сконструирована для перевода символов русской дактильной азбуки (рис. 1) в письменные и устные символы. Перчатка была сконструирована (рис. 2) с использованием пяти гибких датчиков, по одному на каждый палец, гибкий датчик используется для указания изгиба пальца, акселерометр использовался на тыльной стороне ладони для указания положения пальца. Для кода использовалась полнофункциональная отладочная плата Arduino, подключенная к ПК в качестве микроконтроллера, а для подключения перчатки к мобильному телефону через Bluetooth использовался Bluetooth-модуль HC-05 [1].

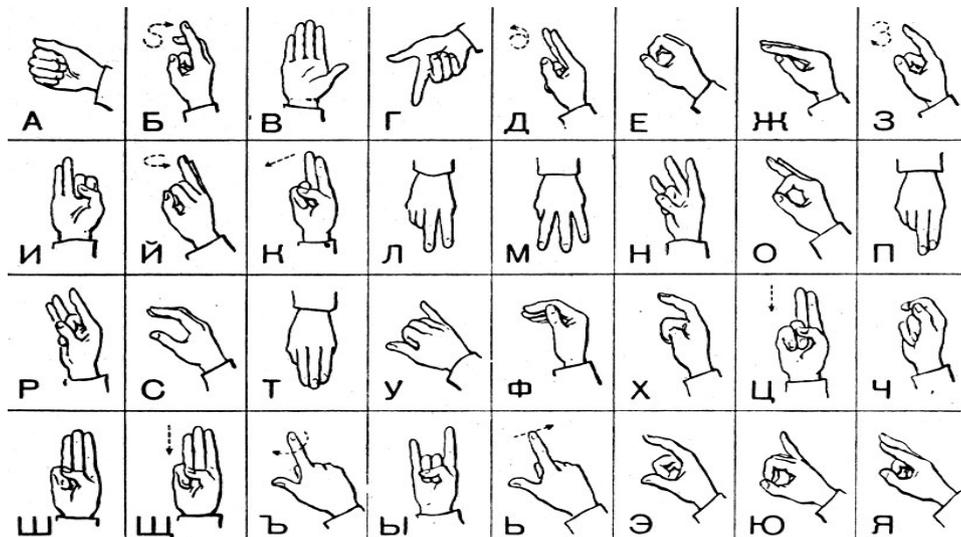


Рис. 1. Русский сурдоалфавит



Рис. 2. Внешний вид роботизированной кисти руки

### Гибкий датчик

Гибкий датчик, как показано на рис. 3, это тип датчика, который измеряет, насколько сильно произошло отклонение или, альтернативно, сгибание. Для его изготовления можно использовать такие материалы, как пластик и углерод. Сопротивление датчика изменится, когда пластиковая полоска, удерживающая углеродную поверхность, будет отведена в сторону. Приложения для такого типа датчиков, включающие в свой состав компьютерный интерфейс и управление серводвигателями, могут использоваться везде, где уровень изгиба можно оценить за счет изменения значения сопротивления датчика [2].

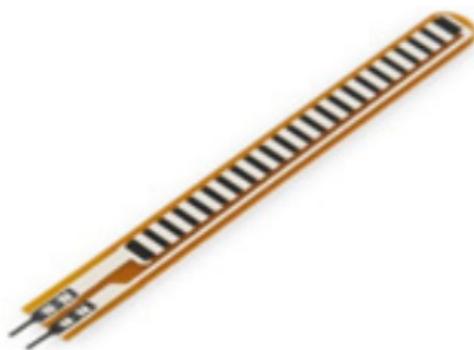


Рис. 3. Гибкий датчик

Структурная схема предлагаемого блока управления представлена на рис. 4. Гибкий датчик представляет собой двухполюсное устройство; в нем отсутствуют какие-либо поляризованные клеммы, такие как конденсаторы или диоды, поэтому нет ни положительных, ни отрицательных клемм. Для активации этого датчика требуется от 3,3 до 5 В постоянного тока, и это напряжение может быть получено с помощью любого интерфейса. Подключение осуществляется следующим образом: для каждого пальца был использован один гибкий провод, путем подключения одного контакта на землю, а второго к аналоговому контакту платы и к 5 В через сопротивление 10 кОм, используя соответствующий код, значение углового диапазона от 0° до 90°, было представлено в виде кода с использованием соответствующей комбинации градусов между пальцами. Этот датчик используется везде, где необходимо определить, насколько сильно устройство согнулось или изменило свой угол. Внутреннее сопротивление этого датчика изменяется примерно линейно в зависимости от угла изгиба датчика.

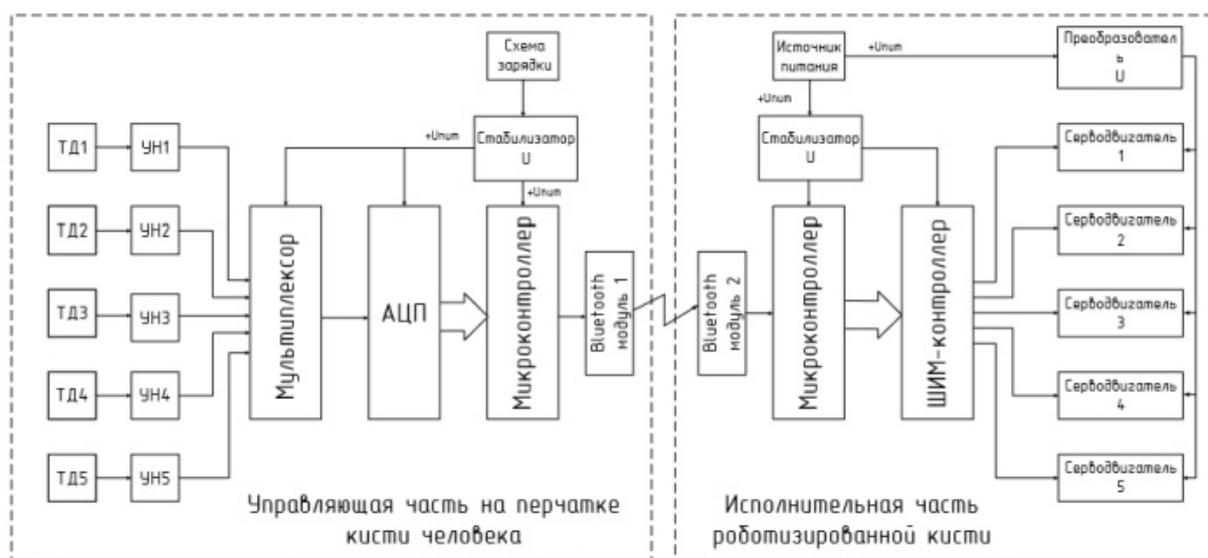


Рис. 4. Структурная схема блока управления роботизированной кистью

### *Bluetooth-модуль HC-05*

Bluetooth-модуль HC-05, как показано на рис. 5, предназначен для настройки прозрачных беспроводных последовательных соединений. Он работает с помощью последовательной передачи, что упрощает взаимодействие с контроллером или ПК. HC-05 имеет два режима работы: командный режим, в котором можно изменять настройки устройства по умолчанию, и режим передачи данных, в котором он может отправлять и получать данные с других устройств, подключенных к Bluetooth. Используя PIN-код ключа, мы можем управлять гаджетом в любом из этих двух режимов. Модуль использовался в тестовом приложении для отправки указанного письма с Arduino на телефон [3].



Рис. 5. Bluetooth модуль HC-05

### *Полнофункциональная отладочная плата Arduino Nano*

Самая маленькая и наиболее традиционная плата Arduino, подходящая для макетной платы, называется Nano [3], показана на рис. 6, имеет Mini-USB-разъем и pin-заголовки, которые упрощают подключение его к макетной плате. Благодаря своим компактным размерам в этой работе был использован Arduino. Интегрированная среда Arduino использовалась для загрузки кода, который затем был присоединен к гибким датчикам, акселерометру, некоторым цифровым выводам, контактным датчикам и модели Bluetooth. Метод, используемый для распространения информации об энергетике, отличается. Несмотря на то, что Bluetooth может обрабатывать большой объем данных, за счет повышенного потребления электроэнергии он быстро разряжает батарею приложения. Решить данную проблему может режим энергосбережения Bluetooth Low Energy.



Рис. 6. Полнофункциональная отладочная плата Arduino Nano

### *Практические результаты*

К основному результату данного предложения следует отнести то, что стандартный язык жестов с некоторыми словами был успешно отображен на дисплее в виде текста и озвучен в виде голоса, а это, несомненно, поможет людям с нарушениями речи и слуха легко общаться с подавляющим большинством членов нашего общества, являющихся здоровыми людьми.

Возможности данного предложения могут быть значительно расширены путем включения в базу данных большего количества слов и использования другого стандартного языка жестов. Другой положительной особенностью данного предложения является то, что она позволяет обычным людям общаться с людьми, имеющими дефекты речи, путем использования тестового приложения для Android (рис. 7, 8), которое преобразует голосовой сигнал людей в текст на дисплее и в язык жестов роботизированной кисти. Поэтому данное предложение целесообразно развивать и использовать для осуществления общения между людьми с нарушением речи и слабослышащих, так как данное предложение позволяет осуществлять двустороннюю связь между людьми, преобразуя при этом практически все буквы и некоторые слова в отличие от существующих других предложений [4].



Рис. 7. Буква «А», выведенная на экран смартфона

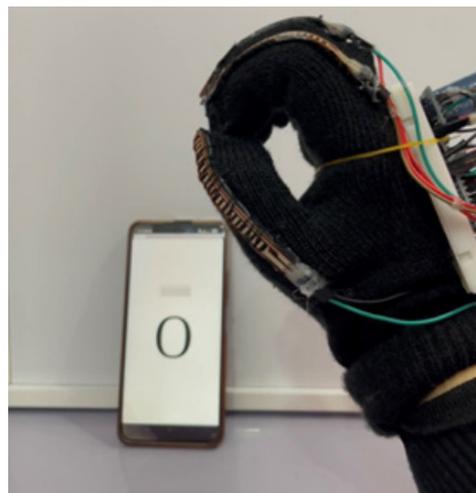


Рис. 8. Буква «О», выведенная на экран смартфона

### *Заключение*

Данное предложение, включающее использование технологии роботизированных перчаток и позволяющее осуществить общение не только между людьми с дефектом речи и слуха, позволяет исключить недопонимание при общении людей с нарушением речи и слуха с обычными, здоровыми гражданами [5]. Также данное предложение будет весьма полезно не только для людей, получивших такую инвалидность естественным путем, но и людям, ставшим такими инвалидами из-за заболеваний полости рта и уха по разным случайным причинам. В дальнейшем результат данного предложения особо будет оценен, когда пользователи столкнутся на практике с тем, что стандартный язык жестов с соответствующими 26 алфавитами будет полностью разобран, использован.

### *Список литературы*

1. Pezzuoli F., Corona D., Corradini M. L. Recognition and classification of dynamic hand gestures by a wearable data-glove // *SN Comput. Sci.* 2021. Vol. 2, № 1. P. 1–9.
2. Буньгин Е. В., Чайковский В. М. Блок управления роботизированной кистью руки // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль.* 2021. № 2. С. 47–52. doi: 10.21685/2307-5538-2021-2-6
3. Atalay O., Kennon W. Knitted strain sensors: Impact of design parameters on sensing properties // *Sensors.* 2014. Vol. 14, № 3. P. 4712–4730.
4. Попова И. В., Субочев А. В. Разработка обучаемой специализированной информационно-поисковой системы // *Программные продукты и системы.* 2011. № 3. С. 22.
5. Ambar R. Preliminary design of a dual-sensor based sign language translator device // Ghazali R., Deris M., Nawi N. [et al.]. *Recent Advances on Soft Computing and Data Mining. SCDM 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Springer, Cham, 2018. P. 353–362.

*References*

1. Pezzuoli F., Corona D., Corradini M.L. Recognition and classification of dynamic hand gestures by a wearable data-glove. *SN Comput. Sci.* 2021;2(1):1–9.
2. Bunygin E.V., Chaykovskiy V.M. Robotic hand control unit. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(2):47–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2021-2-6
3. Atalay O., Kennon W. Knitted strain sensors: Impact of design parameters on sensing properties. *Sensors.* 2014;14(3):4712–4730.
4. Popova I.V., Subochev A.V. Development of a trained specialized information retrieval system. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems.* 2011;(3):22. (In Russ.)
5. Ambar R. *Preliminary design of a dual-sensor based sign language translator device.* Ghazali R., Deris M., Nawi N. et al. *Recent Advances on Soft Computing and Data Mining. SCDM 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Springer, Cham, 2018:353–362.

*Информация об авторах / Information about the authors***Максим Алексеевич Медведев**

студент,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Maksim A. Medvedev**

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

**Виктор Михайлович Чайковский**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Victor M. Chaykovsky**

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 29.02.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 29.03.2023**

**Принята к публикации / Accepted 18.04.2023**

УДК 621.311.25:621.039  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЛОЖНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

А. В. Григорьев<sup>1</sup>, Н. К. Юрков<sup>2</sup>, Е. Т. Ескибаев<sup>3</sup>, А. Г. Избасов<sup>4</sup>, М. Н. Байсеитов<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>3,4,5</sup> Военный институт Сил Воздушной обороны имени дважды Героя Советского Союза Т. Я. Бегельдинова, Актобе, Казахстан

<sup>1</sup>a\_grigorev@mail.ru, <sup>2</sup>yurkov\_nk@mail.ru, <sup>3</sup>erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru,  
<sup>4</sup>iag1973@mail.ru, <sup>5</sup>danikm755@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Все задачи по соблюдению целостности сигнала ложатся как на схемотехника, так и на трассировщика печатного узла. Задача схемотехника по решению вопроса целостности сигнала – знать ограничения высокоскоростного интерфейса. Задача трассировщика – знать и соблюдать правила проектирования высокоскоростных устройств. Для проектирования печатных узлов в настоящее время существует огромное множество программных пакетов. Очевидно, что новые задачи, которые встали перед проектировщиками печатных плат, не могли не найти отражения и в развитии САПР сложных измерительных систем. *Материалы и методы.* Если на первых этапах применение САПР для проектирования печатных плат ограничивалось топологическими задачами и технологическим сопровождением, то по мере того, как проблемы обеспечения целостности сигнала и электромагнитной совместимости становились более актуальными, ведущие производители САПР начали включать определенные процедуры и подсистемы в свою продукцию. Начало 2023 г. ознаменовалось выходом ряда новых версий популярных систем проектирования печатных плат. Часть из них претерпела незначительные изменения, часть была полностью обновлена, но все без исключения расширили свои возможности в направлении целостности сигнала и электромагнитной совместимости. *Результаты.* Различные электрофизические параметры печатного монтажа, эффекты от которых отрицательно влияют на целостность сигнала, приводят к тому, что процесс проектирования платы и печатного узла становится итерационным. Даже при применении виртуального прототипа необходим физический прототип, после испытаний которого в него вносятся определенные изменения. *Выводы.* Наличие виртуального прототипа сокращает срок и стоимость проектирования, но полностью устранить все недочеты можно только при тестировании реальной конструкции.

**Ключевые слова:** целостность сигнала, электрические параметры, сложные измерительные системы

**Для цитирования:** Григорьев А. В., Юрков Н. К., Ескибаев Е. Т., Избасов А. Г., Байсеитов М. Н. Исследование целостности сигнала и электрических параметров в сложных измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 11–21. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-2

## STUDY OF SIGNAL INTEGRITY WHEN MEASURING ELECTRICAL PARAMETERS IN COMPLEX ELECTRONICS SYSTEMS

A.V. Grigoriev<sup>1</sup>, N.K. Yurkov<sup>2</sup>, E.T. Eskibaev<sup>3</sup>, A.G. Izbasov<sup>4</sup>, M.N. Baiseitov<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>3,4,5</sup> Military Institute of Air Defense Forces named after twice Hero of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan

<sup>1</sup>a\_grigorev@mail.ru, <sup>2</sup>yurkov\_nk@mail.ru, <sup>3</sup>erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru,  
<sup>4</sup>iag1973@mail.ru, <sup>5</sup>danikm755@gmail.com

**Abstract.** *Background.* All tasks for maintaining the integrity of the signal fall on both the circuit engineer and the tracer of the printed circuit assembly. The task of the circuit engineer in solving the problem of signal integrity is to know the limitations of the high-speed interface. The task of the tracer is to know and follow the rules for designing high-speed devices. For the design of printed circuit assemblies, there are currently a huge variety of software packages. It is obvious that the new tasks that faced the designers of printed circuit boards could not but be reflected in the development of CAD.

*Materials and methods.* If in the early stages the use of CAD for PCB design was limited to topological tasks and technological support, then as the problems of ensuring signal integrity and EMC became more relevant, leading CAD manufacturers began to include certain procedures and subsystems in their products. The beginning of 2023 was marked by the release of a number of new versions of popular PCB design systems. Some of them have undergone minor changes, some have been completely updated, but all, without exception, have expanded their capabilities in the direction of signal integrity and EMC. *Results.* Various electrophysical parameters of printed wiring, the effects of which negatively affect the integrity of the signal, lead to the fact that the process of designing the board and the printed circuit assembly becomes iterative. Even when using a virtual prototype, a physical prototype is needed, after testing which certain changes are made to it. *Conclusions.* The presence of a virtual prototype reduces the time and cost of design, but it is possible to completely eliminate all the shortcomings only when testing a real design.

**Keywords:** signal integrity, electrical parameters, complex measurement systems

**For citation:** Grigoriev A.V., Yurkov N.K., Eskibaev E.T., Izbasov A.G., Baiseitov M.N. Study of signal integrity when measuring electrical parameters in complex electronics systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):11–21. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-2

### *Введение*

Для моделирования электронной системы на этапе создания виртуального прототипа в основном используются пакеты прикладных программ. В них этапы схемотехнического моделирования и разработки топологии печатных плат или интегральных схем разделены. Сначала проводится моделирование электронных схем без учета паразитных эффектов, присущих реальным топологиям, а затем после разработки конструкции моделирование повторяется с их учетом. Эта процедура охватывает с той или иной полнотой задачи обеспечения целостности сигналов и электромагнитной совместимости (ЭМС).

Уровень развития современных САПР электронных средств открывает широкие возможности для разработчиков печатных плат. Наряду с комплексными системами проектирования (OrCAD, ACCEL EDA, P-CAD, Altium Designer, Mentor Graphics) на рынке информационных технологий широко представлены специализированные программные пакеты для анализа целостности сигналов и ЭМС: Signal Integrity, QUIET, Ansys, Mentor Hyperlinx и др [1]. Большинство из них являются дополнительными модулями к системам проектирования и имеют специальные интерфейсы для импорта проектов, а также для экспорта изменений, внесенных в проект, обратно в систему проектирования.

При проведении анализа эффектов на печатных платах разработчики часто приходят к выводу, что использование инструментов анализа целостности сигналов – это единственный способ исследования этих эффектов путем моделирования. Тем более, что большинство автоматизированных пакетов проектирования уже имеют встроенные модули – анализаторы целостности сигнала, например Mentor Hyperlinx.

Однако такие программные пакеты имеют весьма высокую цену на приобретение лицензии, что делает невозможным их покупку как для студентов или начинающих проектировщиков, так и для университета и предприятия. Следовательно, необходимо искать другие методы и программные пакеты для решения возникших во время проектирования задач.

### *Применение моделей для расчета погонной емкости*

Некоторые программные пакеты, цена которых не высока, не имеют встроенных анализаторов целостности сигнала, учитывающих электрофизические параметры печатного монтажа. Поэтому возникает задача использования сторонних программ для грамотного проектирования топологии печатной платы.

Такие программы часто встречаются в свободном доступе или же являются весьма дешевыми. Они представляют из себя средства для расчета таких параметров, как индуктивность, емкость, импеданс, волновое сопротивление. Однако при использовании таких программ возникает вопрос: насколько точным будет результат расчета? Не зная модель, которая применяется в тех или иных калькуляторах, трудно оценить точность полученных результатов, что может привести к некорректной работе устройства впоследствии.

Модели для расчета погонной емкости микрополосковой линии и анализ расчетов, полученных с их использованием, показали, что результаты могут как сильно расходиться друг от друга, так и быть достаточно точными [2]. Узнать, какая модель используется чаще всего,

не представляется возможным, поэтому к использованию сторонних программных средств во время проектирования нужно подходить весьма обстоятельно.

Расчеты моделей погонной емкости, представленные в данной работе, и сравнение их результатов помогут обойтись без использования сторонних программ для расчета этого параметра – достаточно выбрать самую подходящую модель.

**Выбор модели в зависимости от точности, сложности, диапазона входных параметров, ширины проводника, относительной диэлектрической проницаемости и толщины диэлектрика**

Для измерений использовалась печатная плата, основанием которой является материал Duroid 5880 компании Rogers Corporation. Данный материал разработан как альтернатива армированному фторопласту (PTFE) с низкой анизотропией коэффициента диэлектрической проницаемости. Малая диэлектрическая проницаемость делает их оптимальными для СВЧ устройств, где дисперсия и потери должны быть минимизированы. Благодаря малым характеристиками влагопоглощения материалы Duroid 5870 и 5880 нашли применение в условиях с высокой влажностью. По заявлению авторов, данный материал имеет самый низкий показатель электрических потерь, не требует специальных условий хранения в связи с малым поглощением влаги, а также имеет единые электрические свойства для очень широкого диапазона частот. Основные характеристики материала представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики Duroid 5880

Диэлектрическая постоянная, $\epsilon_r$ на частоте 10 ГГц	2,20 ± 1 %
Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10 ГГц	0,0015
Тепловой коэффициент расширения 50–150 °С, ppm/°С	–125
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,2
Толщина $h$ , мм	3,2

С одной стороны, основание печатной платы облицовано медью толщиной 35 мкм. С другой стороны, на плате размещены медные дорожки длиной 46 см, шириной от 0,038 до 69 мм и толщиной 35 мкм. Погрешность в измерении габаритов печатной платы составляет примерно ±2 %. Также автором эксперимента гарантируется погрешность измерения емкости < 1 % [3].

В табл. 2 представлены экспериментально измеренные значения емкости микрополосковой линии на частоте 1 кГц.

Таблица 2

Экспериментально измеренные значения емкости микрополосковой линии

Ширина $w$ , мм	Емкость $C_z$ , пФ/см
0,38	0,22
0,50	0,24
0,79	0,28
1,6	0,343
2,54	0,417
3,175	0,465
6,35	0,681
25,4	1,933
68,58	4,606

Опираясь на эти данные, из представленных можем выбрать те модели, результат которых будет максимально близок к реальным значениям.

**Результаты для модели Кауппа**

Для модели Кауппа результаты сведены в табл. 3, а также представлены на рис. 1.

Таблица 3

Результаты для модели Кауппа

$w$ , мм	$w/h$	$C$ , пФ/см	$C_3$ , пФ/см
0,38	0,118	0,232	0,22
0,5	0,157	0,248	0,24
0,79	0,244	0,279	0,28
1,6	0,469	0,35	0,34
2,54	0,787	0,421	0,41
3,175	0,984	0,468	0,465
6,35	1,969	0,71	0,681
25,4	7,874	-17,712	1,933
68,58	21,26	-0,902	4,606



Рис. 1. Результаты для модели Кауппа

Эта модель является довольно простой для расчета, однако, как видно из рис. 1, результаты сильно отклоняются от реальных, когда значение ширины проводника составляет 25,4 мм, что говорит о ее неуниверсальности, что является существенным недостатком при проектировании каких-либо САД-систем.

Ошибка данной модели на промежутке до ширины проводника 25,4 мм составляет 4,7 %.

#### Результаты для модели Шнайдера

Для модели Шнайдера результаты сведены в табл. 4, а также показаны на графике на рис. 2.

Таблица 4

Результаты для модели Шнайдера

$w$ , мм	$w/h$	$C$ , пФ/см	$C_3$ , пФ/см
0,38	0,118	0,222	0,22
0,5	0,157	0,24	0,24
0,79	0,244	0,273	0,28
1,6	0,469	0,349	0,34
2,54	0,787	0,424	0,41
3,175	0,984	0,471	0,465
6,35	1,969	0,682	0,681
25,4	7,874	1,891	1,933
68,58	21,26	4,529	4,606



Рис. 2. Результаты для модели Шнайдера

Данная модель является самой точной из всех описанных выше. Процент ошибки составляет всего 1,3 %.

#### Результаты для модели Уэллера – Шнайдера

Для модели Уэллера–Шнайдера результаты сведены в табл. 5 и представлены на графике на рис. 3.

Таблица 5

Результаты для модели Уэллера – Шнайдера

w, мм	w/h	C, пФ/см	C <sub>3</sub> , пФ/см
0,38	0,118	0,278	0,22
0,5	0,157	0,293	0,24
0,79	0,244	0,314	0,28
1,6	0,469	0,354	0,34
2,54	0,787	0,433	0,41
3,175	0,984	0,582	0,465
6,35	1,969	0,828	0,681
25,4	7,874	2,126	1,933
68,58	21,26	4,836	4,606

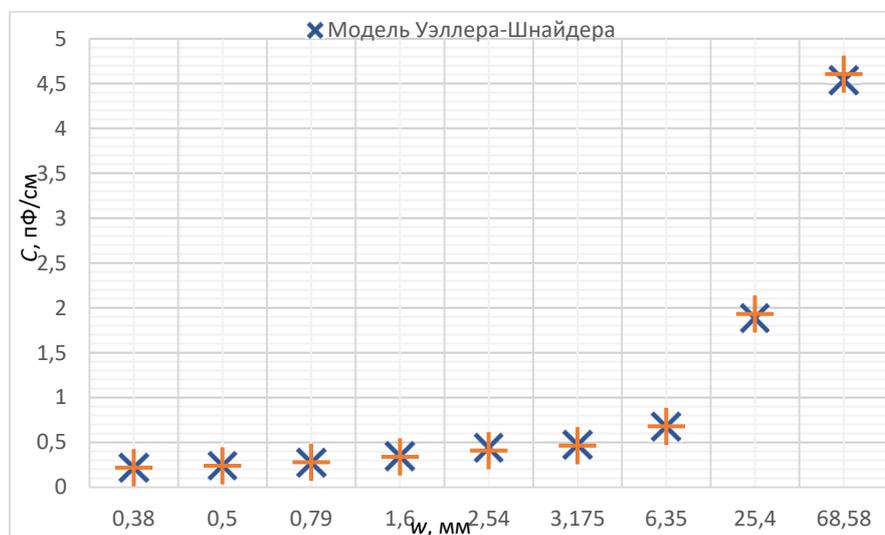


Рис. 3. Результаты для модели Уэллера – Шнайдера

Процент погрешности данной модели составляет 3,3 %.

### Результаты для модели Поха

Для модели Поха результаты представлены в табл. 6 и также на графике на рис. 4.

Таблица 6

#### Результаты для модели Поха

$w$ , мм	$W/h$	$C$ , пФ/см	$C_3$ , пФ/см
0,38	0,118	0,224	0,22
0,5	0,157	0,242	0,24
0,79	0,244	0,275	0,28
1,6	0,469	0,35	0,34
2,54	0,787	0,439	0,41
3,175	0,984	0,474	0,465
6,35	1,969	0,675	0,681
25,4	7,874	1,882	1,933
68,58	21,26	4,541	4,606

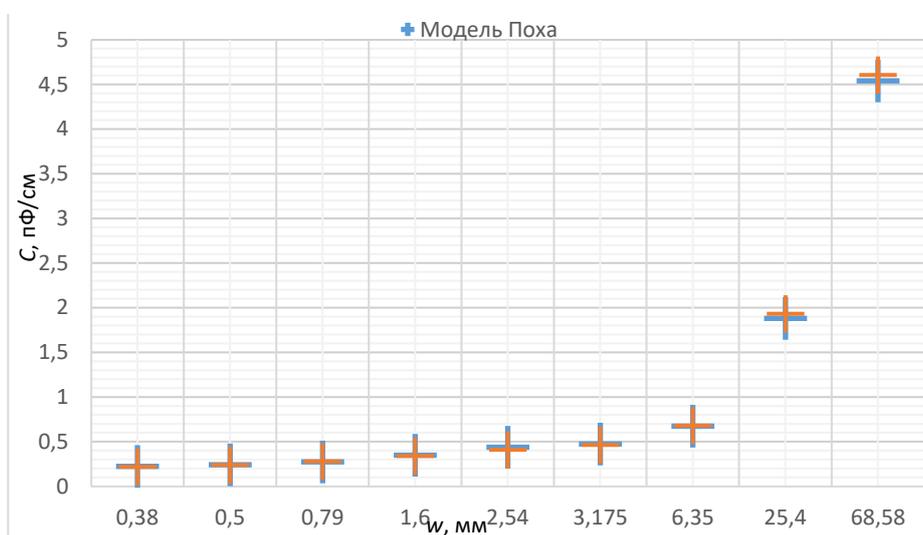


Рис. 4. Результаты для модели Поха

Как видно из табл. 6 и рис. 4, данная модель не сильно расходится с реальными значениями. Процент ошибки относительно измеренных значений согласно соотношению составляет 1,93 %.

### Результаты для модели Сакураи и Тамару

Для модели Сакураи и Тамару результаты сведены в табл. 7 и представлены на графике на рис. 5.

Таблица 7

#### Результаты для модели Сакураи и Тамару

$w$ , мм	$W/h$	$C$ , пФ/см	$C_3$ , пФ/см
0,38	0,118	0,213	0,22
0,5	0,157	0,221	0,24
0,79	0,244	0,241	0,28
1,6	0,469	0,297	0,34
2,54	0,787	0,363	0,41
3,175	0,984	0,407	0,465
6,35	1,969	0,627	0,681
25,4	7,874	1,951	1,933
68,58	21,26	4,951	4,606

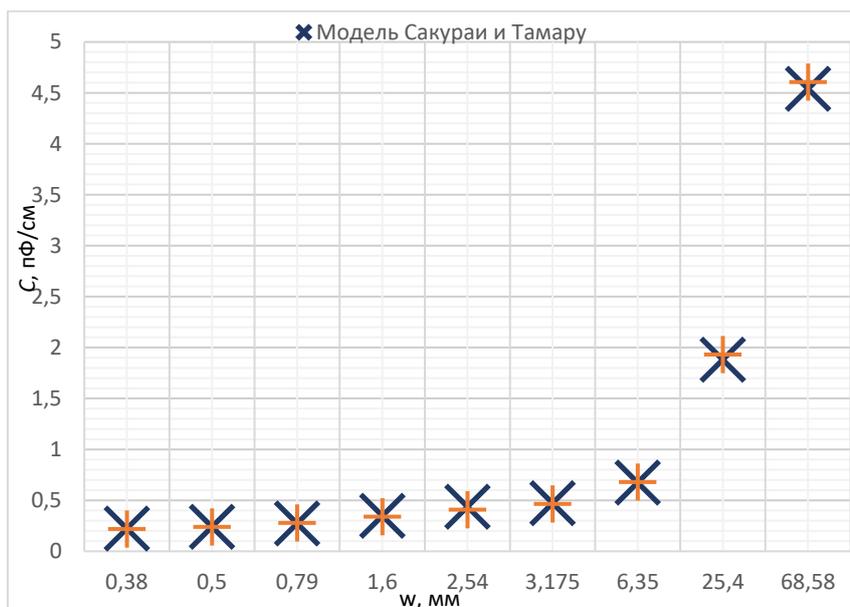


Рис. 5. Результаты для модели Сакураи и Тамару

Ошибка этой модели относительно экспериментальных данных составляет около 10 %.

**Результаты для модели Кумара**

Для модели Кумара результаты сведены в табл. 8 и представлены на графике на рис. 6.

Таблица 8

Результаты для модели Поха

w, мм	W/h	C, пФ/см	C <sub>3</sub> , пФ/см
0,38	0,118	0,184	0,22
0,5	0,157	0,19	0,24
0,79	0,244	0,204	0,28
1,6	0,469	0,245	0,34
2,54	0,787	0,293	0,41
3,175	0,984	0,325	0,465
6,35	1,969	0,485	0,681
25,4	7,874	1,448	1,933
68,58	21,26	3,63	4,606

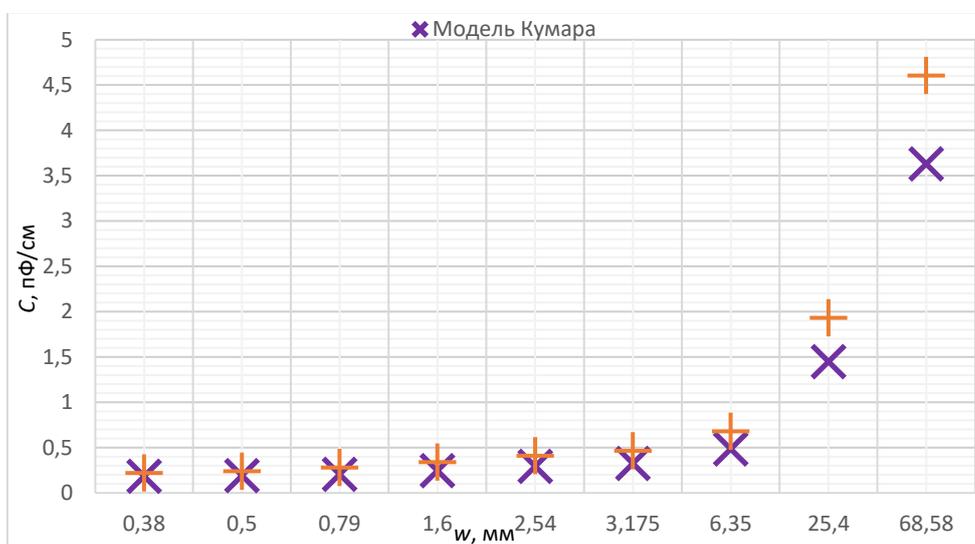


Рис. 6. Результаты для модели Кумара

Данная модель оказалась самой неточной из всех представленных. Процент погрешности составляет 28 %, что делает ее совершенно непригодной для использования.

### Сравнение моделей

Чтобы сравнить все модели между собой и выбрать самую адекватную для применения, их необходимо сравнить между собой. Для наглядности погрешности относительно экспериментальных данных для всех моделей сведены в табл. 9.

Таблица 9

Погрешности моделей расчета емкости микрополосковой линии

Модель	Погрешность, %
Модель Кауппа	4,7
Модель Шнайдера	1,3
Модель Уэллера – Шнайдера	3,3
Модель Поха и др.	1,93
Модель Сакураи и Тамару	10
Модель Кумара	28

Как видно, модель Сакураи и Тамару, а также модель Кумара оказались самыми неточными из всех описанных. Однако, чтобы грамотно оценить качество результатов, необходимо свести их в один график, что позволит отследить их отклонения относительно экспериментальных данных при всех значениях ширины проводника  $w$ .

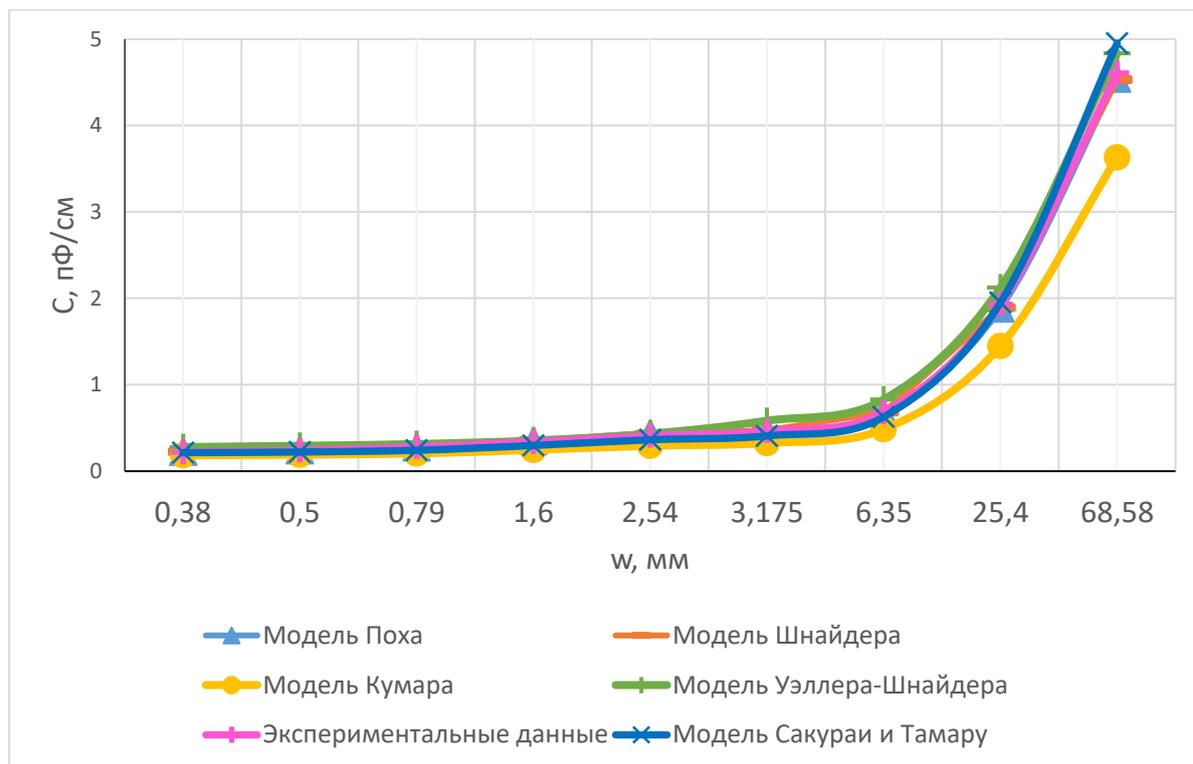


Рис. 7. Результаты расчета моделей относительно экспериментально измеренных значений

Анализируя рис. 7, который наглядно отражает результаты расчетов каждой модели относительно друг друга, видно, что при ширине проводника  $w < 6,35$  мм наблюдается минимальное расхождение результатов каждой модели друг от друга и от экспериментальных данных. Однако при большей ширине проводника  $w$  наблюдается значительный разброс данных.

Опираясь на данные на рис. 8, а также учитывая значения погрешностей результатов моделей относительно экспериментальных данных, представленных в табл. 9, можно сделать следующие выводы:

- при ширине проводника  $w \leq 6,35$  мм любая модель из представленных дает результат с хорошей точностью (до 10 %);
- для ширины проводника  $w > 6,35$  мм модель Кауппа совершенно непригодна для использования;
- при ширине проводника  $w > 6,35$  мм значения емкости, рассчитанной по модели Кумара, отклоняются в меньшую сторону от экспериментальных данных сильнее других, что приведет к ошибкам при последующих расчетах, что также делает ее непригодной для использования;
- модель Шнайдера является самой точной для любого значения ширины проводника  $w$ .

### *Заключение*

Развитие цифровых систем идет под знаком повышения быстродействия. На это направлены усилия разработчиков и изготовителей интегральных микросхем, системотехников и схемотехников, конструкторов и технологов электронных устройств и систем. Традиционно для относительно низкочастотной аппаратуры требовалось решить в основном топологические задачи по безошибочной трассировке печатного монтажа, а некоторые особенности функционирования платы оговаривал разработчик принципиальной схемы. При проектировании плат для быстродействующих систем таких оговорок накапливается слишком много, что исключает эффективную работу конструктора. Он должен быть сам достаточно квалифицирован для принятия технических решений в новой изменившейся ситуации, для ведения конструктивного диалога со схемотехником, а также для анализа результатов испытаний и измерений.

В данной работе было представлено исследование процессов, которые происходят в быстродействующей цифровой аппаратуре. Были оговорены основные виды помех, которые возникают в плохо спроектированном устройстве. Однако возникновение помех чаще всего связано с электрофизическими параметрами печатного монтажа. Разработчик платы должен понимать, что в быстродействующих устройствах любое изменение рисунка монтажа, ширины и длины проводников, диаметров металлизированных отверстий и других факторов приведет к изменению электрических и физических параметров монтажа (емкость, индуктивность, волновое сопротивление и др.), что скажется на качестве обработки сигнала. Иногда эти изменения мало заметны, но чем выше быстродействие, тем сильнее зависимость электрофизических параметров межсоединений от конструкции платы, и тем более обоснованы и продуманы должны быть решения. Одному из основных электрофизических параметров печатного монтажа было уделено основное внимание – погонная емкость. Были представлены модели, проведены расчеты, а также проведен их анализ между собой. Использование этих моделей может существенно помочь избежать ошибок, а также дает возможность не использовать сторонние программы для расчетов этого параметра.

### *Список литературы*

1. Рыбаков И. М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 44–50. doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-5 EDN: MTOSWQ
2. Реута Н. С., Рыбаков И. М., Кошеленко П. Г., Володин В. Ю. К проблеме анализа средств измерения и их влияние на показатели надежности // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2022»): материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для обучающихся и молодых ученых (г. Пенза, 24–26 октября 2022 г.). Пенза: Изд-во ПГУ, 2022. С. 54–58. EDN: MUMWFY
3. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.] Дизъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 106–113. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-13 EDN: UQJNHJ
4. Рыбаков И. М., Лысенко А. В., Бростилов С. А., Герасимова Ю. Е. Информационно-измерительная и управляющая система теплофизического моделирования параметров электронной аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2. С. 36–45. doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-3 EDN: BJZNEH

5. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Методологии построения систем поддержки принятия решений в многоаспектной области применения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 18–22. EDN: GFONMS
6. Гришко А. К. Многокритериальное принятие проектных решений в условиях частичной неопределенности // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 51–53. EDN: IJLTKF
7. Rybakov I. M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models // 2022 19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, 2022. P. 50–53. doi: 10.1109/TSCZh55469.2022.9802495 EDN: TSCZh

### References

1. Rybakov I.M. Models and methods of measuring electrical parameters in complex systems of electronics. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):44–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-5 EDN: MTOSWQ
2. Reuta N.S., Rybakov I.M., Koshelenko P.G., Volodin V.Yu. On the problem of analysis of measuring instruments and their influence on reliability indicators. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2022»): materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauchnoy shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skikh rabot dlya obuchayushchikhsya i molodykh uchenykh (g. Penza, 24–26 oktyabrya 2022 g.) = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky Readings – 2022") : materials of the XIV International Scientific and Technical conf. with the elements of the scientific school and the competition of research papers for students and young scientists (Penza, October 24-26, 2022)*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:54–58. (In Russ.). EDN: MYMWFY
3. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Disjunctive model of the invariant of the state of the object of control. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):106–113. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-13 EDN: UQJHHJ
4. Rybakov I.M., Lysenko A.V., Brostilov S.A., Gerasimova Yu.E. Information-measuring and control system of thermophysical modeling of parameters of electronic equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2022;(2):36–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2022-2-3 EDN: BJZNEH
5. Mikheev M.Yu., Prokof'ev O.V., Semochkina I.Yu. Methodologies for building decision support systems in a multidimensional field of application. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:18–22. (In Russ.). EDN: GFONMS
6. Grishko A.K. Multi-criteria decision-making in conditions of partial uncertainty. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2021;1:51–53. (In Russ.). EDN: IJLTKF
7. Rybakov I.M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models. *2022 19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky*. 2022:50–53. doi: 10.1109/TSCZh55469.2022.9802495 EDN: TSCZh

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Алексей Валерьевич Григорьев

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: a\_grigorev@mail.ru

#### Aleksey V. Grigoriev

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: yurkov\_nk@mail.ru

#### Nikolay K. Yurkov

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

**Ербол Токтамысович Ескибаев**

начальник кафедры тактики авиации,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
имени дважды Героя Советского Союза  
Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе,  
пр-т Алии Молдагуловой 39)  
E-mail: erbol.eskibaev\_26.04@mail.ru

**Erbol T. Eskibaev**

Head of the sub-department of tactics of aviation,  
Military Institute of Air Defense Forces  
named after twice Hero  
of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov  
(39 Aliya Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

**Аскар Гадылшиевич Избасов**

заместитель начальника,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
имени дважды Героя Советского Союза  
Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе,  
пр-т Алии Молдагуловой 39)  
E-mail: iag1973@mail.ru

**Askar G. Izbasov**

Deputy head,  
Military Institute of Air Defense Forces  
named after twice Hero  
of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov  
(39 Aliya Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

**Мади Нуралиевич Байсеитов**

преподаватель,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
имени дважды Героя Советского Союза  
Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе,  
пр-т Алии Молдагуловой 39)  
(Казахстан, Алматинская обл., п. Жетыген)  
E-mail: danikm755@gmail.com

**Madi N. Bayseitov**

Teacher,  
Military Institute of Air Defense Forces  
named after twice Hero  
of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov  
(39 Aliya Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)  
(Zhetygen village, Almaty region, Kazakhstan)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 24.03.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 27.04.2023**

**Принята к публикации/Accepted 27.05.2023**

УДК 684.4.05  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-3

## СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ

**Т. О. Зинченко**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
scar0243@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования является информационно-измерительная и управляющая система синтеза прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза. Предмет исследования – структура указанной информационно-измерительной и управляющей системы. Цель работы заключается в повышении управляемости синтеза прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза, что достигается посредством разработки усовершенствованной информационно-измерительной управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов, ее аппаратного и программного обеспечения. *Материалы и методы.* Структурная схема информационно-измерительной и управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов содержит аппаратную и программную части. В частности, аппаратная часть состоит из блоков, необходимых для осуществления и управления процессом спрей-пиролиза, каналов измерения температуры подложки (на основе применения термомпары) и электрофизических параметров синтезированных прозрачных проводящих оксидов (на основе четырехзондового метода). *Результаты.* Разработана структура информационно-измерительной и управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов. Проведены исследования поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов. Разработана структура канала измерения температуры подложки при выполнении процесса спрей-пиролиза. *Выводы.* Разработанная структура информационно-измерительной управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов позволяет решить следующие задачи: осуществлять выбор оптимальных технологических параметров формируемых покрытий; выполнять синтез покрытий посредством управления технологическим процессом; измерять температуру и электрофизические параметры прозрачных проводящих покрытий.

**Ключевые слова:** структура информационно-измерительной и управляющей системы, измерительные каналы, поверхностное сопротивление, температура, спрей-пиролиз

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 23-29-00343).

**Для цитирования:** Зинченко Т. О. Структура информационно-измерительной и управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 22–27. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-3

## STRUCTURE OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT CONTROL SYSTEM FOR THE SYNTHESIS OF TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES

**T.O. Zinchenko**

Penza State University, Penza, Russia  
scar0243@gmail.com

**Abstract.** *Background.* The object of the study is an information-measuring and control system for the synthesis of transparent conductive oxides by spray pyrolysis. The subject of the study is the structure of the specified information-measuring and control system. The aim of the work is to increase the controllability of the synthesis of transparent conductive oxides by spray pyrolysis, which is achieved through the development of an improved information and measurement control system for the synthesis of transparent conductive oxides, its hardware and software. *Materials and methods.* The block diagram of the information-measuring and control system for the synthesis of transparent conductive oxides contains hardware and software parts. In particular, the hardware part consists of blocks necessary for the implementation and control of the spray pyrolysis process, channels for measuring the temperature of the substrate (based on the use of a

thermocouple) and electrophysical parameters of synthesized transparent conductive oxides (based on the four-probe method). *Results*. The structure of the information-measuring and control system for the synthesis of transparent conductive oxides has been developed. Studies of the surface resistance of transparent conductive oxides have been carried out. The structure of the channel for measuring the temperature of the substrate during the spray pyrolysis process has been developed. *Conclusions*. The developed structure of the information-measuring control system for the synthesis of transparent conductive oxides allows us to solve the following tasks: to select the optimal technological parameters of the coatings being formed; to perform the synthesis of coatings by controlling the technological process; to measure the temperature and electrophysical parameters of transparent conductive coatings.

**Keywords:** the structure of the information – measuring and control system, measuring channels, surface resistance, temperature, spray pyrolysis

**Financing:** the work was supported by the Russian Science Foundation (RGNF grant 23-29-00343).

**For citation:** Zinchenko T.O. Structure of the information and measurement control system for the synthesis of transparent conductive oxides. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control. 2023;(2):22–27. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-3*

### *Введение*

Согласно современным направлениям исследований технологий и техники, создание новых материалов и интеллектуализация технологии их производства являются одним из передовых направлений современной науки. Одним из таких материалов являются прозрачные проводящие тонкопленочные оксиды, получаемые различными химическими (в основном) методами и обладающие высокими показателями проводимости и высокой пропускной способностью света в видимом диапазоне спектра, которые нашли множество применений [1–6].

Но в настоящее время имеются недостатки в технологии производства данных материалов, а именно: высокая стоимость синтеза подобных покрытий, сложность оборудования, из-за использования, как правило, вакуума. На сегодняшний день применение метода спрей-пиролиза решает эти проблемы.

Однако методу пиролиза аэрозолей присуща основная проблема, связанная с низкой управляемостью процесса, что приводит к затруднению воспроизводимости покрытий с заданными свойствами. Это вызвано следующими причинами:

- трудность подбора оптимальных технологических параметров вследствие большого количества разнородных факторов, одновременно влияющих на свойства формируемых покрытий;
- отсутствие базы образцов, учитывающей влияние основных параметров технологического процесса на конечные свойства покрытий.
- отсутствие информационно-измерительной управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов.

### *Метод спрей-пиролиза для синтеза прозрачных проводящих оксидов*

Спрей-пиролиз – метод, основанный на пиролитическом разложении раствора. В процессе распыления раствор проходит через этапы: образование пара, осадка и в конечном итоге тонкой пленки. В качестве основы раствора используют либо водные, либо спиртовые основы. Метод применяется в различных отраслях [7].

Основные преимущества этого метода – простота и возможность синтеза покрытий на подложки разной формы и размера.

Общий принцип метода представлен на рис. 1.

В данной работе решена задача создания информационно-измерительной системы для управления процессом синтеза прозрачных проводящих оксидов с целью контроля температурного режима подложки, а также контроля параметров покрытия, на базе измерителя поверхностного сопротивления.

Для разработки информационно-измерительной системы управления синтезом прозрачных проводящих оксидов рассмотрен процесс синтеза прозрачных проводящих оксидов с точки зрения управления им и измерений параметров. На основе выполненного анализа взаимосвязей между технологическими режимами и параметрами покрытий определен перечень параметров, требующих измерения и управления при синтезе прозрачных проводящих оксидов.

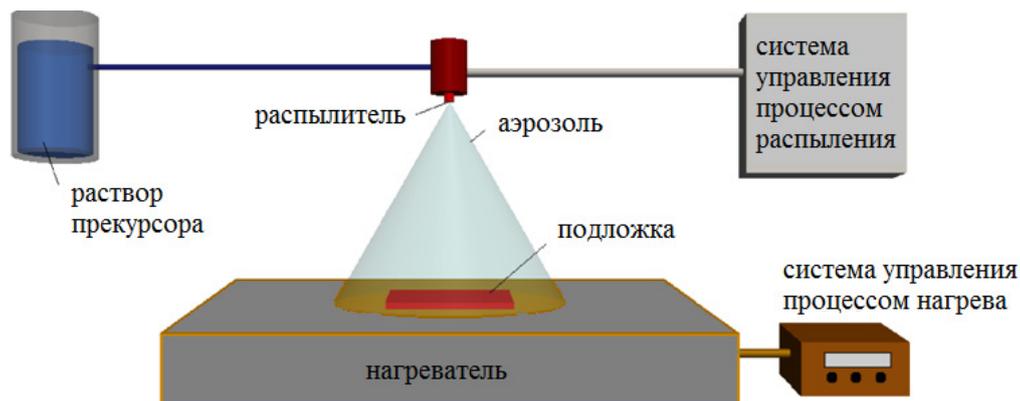


Рис. 1. Реализация метода спрей-пиролиза

Основными факторами, влияющими на параметры покрытий, являются технологические режимы, представленные в работе [8].

Параметром контроля покрытия является поверхностное сопротивление, поскольку от него напрямую зависит возможность применения прозрачного проводящего оксида в полупроводниковой отрасли.

#### *Разработка канала измерения поверхностного сопротивления*

На рис. 2 и 3 приведены структурная схема и фотография установки, с помощью которой выполнены измерения поверхностного сопротивления  $R_s$  полученных ранее образцов [9, 10]. При измерениях поверхностного сопротивления используются следующие средства:

- четырехзондовая головка;
- источник питания;
- цифровые мультиметры.

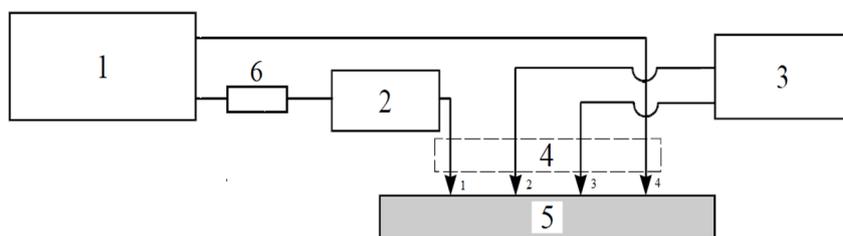


Рис. 2. Структурная схема канала измерения поверхностного сопротивления на основе четырехзондового метода: 1 – источник тока; 2 – устройство для измерения силы тока; 3 – вольтметр; 4 – устройство с четырьмя зондами; 5 – измеряемый образец; 6 – элемент постоянного сопротивления



Рис. 3. Фотография четырехзондовой системы измерений

Методика выполнения измерений:

- собрать систему измерений исходя из структуры, изображенной на рис. 2;
- измеряемый образец закрепить на столике для измерений;
- установить зонды четырехзондовой головки на образец;
- установить величину силы тока  $I_{14} = (1 - 5)$  мА;
- выполнить измерение напряжения  $U_{23}$ ;
- выполнить расчет поверхностного сопротивления по следующей формуле:

$$R_s = f\left(\frac{a}{b}, \frac{b}{s}\right) \frac{U_{23}}{I_{14}}, \quad (1)$$

где  $a$  – длина образца;  $b$  – ширина образца;  $f$  – поправочная функция.

#### Разработка структуры канала измерения температуры подложки

На рис. 4 представлена структура канала нагрева и измерения температуры.



Рис. 4. Структурная схема канала нагрева и измерения температуры

На рис. 5 изображен измерительный канал температуры подложки, на которую наносятся прозрачные проводящие оксиды.



Рис. 5. Канал измерения температуры с компенсационной температурой: ТП1 – термопара; ТП2 – дополнительная термопара; КП – провода; Е – термо-ЭДС;  $U$  – напряжение; ЦС – цифровой сигнал;  $\Theta_0$  – температура термостата;  $\Theta_1$  – температура свободных концов термопары;  $\Theta_2$  – температура компенсационных проводов на конце линии;  $\Theta_x$  – измеряемая температура

#### Заключение

Предложена структура каналов измерения температуры подложки, на которую осуществляется нанесение прозрачного проводящего покрытия методом спрей-пиролиза и структура канала измерения поверхностного сопротивления полученного покрытия.

Представлена методика измерений поверхностного сопротивления, основанная на использовании четырехзондового метода, которая позволяет косвенно определить поверхностное сопротивление.

Канал измерения температуры позволяет осуществлять нагрев подложки до требуемого значения и осуществляет стабилизацию заданного значения посредством управляющих сигналов информационно-измерительной и управляющей системы.

### Список литературы

1. Николаев К. О., Зинченко Т. О. Альтернативные способы получения функциональных слоев солнечных элементов нового поколения // Вестник научных конференций. 2017. № 9-3. С. 139–140.
2. Зинченко Т. О. Прозрачные проводящие покрытия на основе диоксида олова и их применение в солнечных элементах // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В. М. Шляндина. Пенза, 2018. С. 129–132.
3. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Паличев А. М. [и др.]. Прозрачные проводящие оксиды и их применение в умных стеклах // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2019»): материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. Е. А. Печерской. Пенза, 2019. С. 315–318.
4. Зинченко Т. О., Печерская Е. А. Прозрачные проводящие оксиды и их применение в устройствах опто-, нано- и микроэлектроники // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. науч. ст. по материалам XXXIV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / под ред. М. А. Щербакова. Пенза, 2021. С. 108–111.
5. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Антипенко В. В. [и др.]. Синтез оксидных материалов для электрохромных панелей методом спрей – пиролиза // XXII Междунар. конф. молодых специалистов в области электронных приборов и материалов (EDM 2021) : дайджесты. Новосибирск, 2021. С. 261–266.
6. Зинченко Т. О. Принципы построения мультисенсорных систем газоаналитических приборов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 24-й Всерос. молодежной науч. конф. Ульяновск, 2021. С. 201–202.
7. Зинченко Т. О., Печерская Е. А. Анализ методов получения прозрачных проводящих покрытий // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. Пенза, 2018. С. 258–260.
8. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Печерский А. В. [и др.]. Анализ параметров качества технологического процесса синтеза прозрачных проводящих оксидов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 100–109.
9. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И. [и др.]. Анализ факторов, влияющих на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 64–72.
10. Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Кравцов А. Н. [и др.]. Разработка технологии спрей-пиролиза для синтеза прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 4. С. 92–103.

### References

1. Nikolaev K.O., Zinchenko T.O. Alternative methods of obtaining functional layers of new generation solar cells. *Vestnik nauchnykh konferentsiy = Bulletin of scientific conferences*. 2017;(9-3):139–140. (In Russ.)
2. Zinchenko T.O. Transparent conductive coatings based on tin dioxide and their application in solar cells. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.M. Shlyandina = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information : materials of International Scientific and Technical conf., dedicated. The 100th anniversary of the birth of V. M. Shlyandin*. Penza, 2018:129–132. (In Russ.)
3. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Palichev A.M. et al. Transparent conductive oxides and their application in smart glasses. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2019»): materialy XI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauchnoy shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skikh rabot dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky readings – 2019") : materials of the XI International Scientific and Technical. conf. with elements of a*

- scientific school and a competition of research papers for students, postgraduates and young scientists. Ed. by E.A. Pecherskoy. Penza, 2019:315–318. (In Russ.)
4. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A. Transparent conductive oxides and their application in opto-, nano- and microelectronics devices. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. nauch. st. po materialam XXXIV Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem = Problems of automation and control in technical systems : collection of scientific articles based on the materials of XXXIV All-Russian Scientific-Technical. conf. with the international participation.* Ed. by M.A. Shcherbakova. Penza, 2021:108–111. (In Russ.)
  5. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Antipenko V.V. et al. Synthesis of oxide materials for electro-chrome panels by spray pyrolysis method. *XXII Mezhdunar. konf. molodykh spetsialistov v oblasti elektronnykh priborov i materialov (EDM 2021): dayzhesty = XXII International Conference of Young specialists in the field of electronic devices and materials (EDM 2021) : digests.* Novosibirsk, 2021:261–266. (In Russ.)
  6. Zinchenko T.O. Principles of construction of multisensory systems of gas-analytical devices. *Aktual'nye problemy fizicheskoy i funktsional'noy elektroniki: materialy 24-y Vseros. molodezhnoy nauch. konf. = Actual problems of physical and functional electronics : materials of the 24th All-Russian. youth scientific conference.* Ul'yanovsk, 2021:201–202. (In Russ.)
  7. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A. Analysis of methods for obtaining transparent conductive coatings. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. = Information technologies in science and education. Problems and prospects : collection of scientific art. Vseros. inter-university. scientific and practical conf.* Ed. by L.R. Fionovoy. Penza, 2018:258–260. (In Russ.)
  8. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Pecherskiy A.V. et al. Analysis of quality parameters of the technological process of synthesis of transparent conductive oxides. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):100–109. (In Russ.)
  9. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I. et al. Analysis of factors affecting the electrophysical properties of transparent conductive coatings. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(1):64–72. (In Russ.)
  10. Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O., Kravtsov A.N. et al. Development of spray pyrolysis technology for synthesis of transparent conductive coatings based on tin dioxide. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences.* 2020;(4):92–103. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Тимур Олегович Зинченко**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: scar0243@gmail.com

**Timur O. Zinchenko**

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

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 29.02.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 29.03.2023**

**Принята к публикации / Accepted 28.04.2023**

## ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

А. В. Полтавский<sup>1</sup>, А. В. Григорьев<sup>2</sup>, А. И. Мельничук<sup>3</sup>, А. Г. Избасов<sup>4</sup>, И. М. Рыбаков<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

<sup>2,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>3</sup> Учебная авиационная база Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков МО РФ, Ртищево, Саратовская обл., Россия

<sup>4</sup> Военный институт Сил воздушной обороны имени дважды Героя Советского Союза Т. Я. Бегельдинова, Актобе, Казахстан

<sup>1</sup> avp57avp@yandex.ru, <sup>2</sup> a\_grigorev@mail.ru, <sup>3</sup> pelmenio@mail.ru, <sup>4</sup> iag1973@mail.ru, <sup>5</sup> rybakov\_im@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Цель работы – рассмотреть один из возможных подходов модификации моделей и алгоритмов обработки информации применительно к информационно-измерительным и управляющим системам (ИИУС) мобильных роботов (МР). Состав ИИУС составляет ядро для современных информационно-управляющих систем как одной из основных компонент для технической кибернетики. *Материалы и методы.* Методы, модели и реализующие действующие алгоритмы предварительного проектирования объектов ИИУС с разработкой современных систем автоматизированного проектирования данных объектов многофункциональным МР с оценкой основных показателей качества и функциональной эффективности, включающие комплекс информационных моделей аналитического конструирования, позволяют подключить их к динамическим модулям информационно-аналитической системы как современной информационной конструкции. *Результаты.* В качестве объекта исследования рассматривается ИИУС с многоспектральной оптико-электронной системой (ОЭС) мобильного робота. Предлагаются подход и действующие алгоритмы для осуществления задачи обработки сигналов ОЭС с возможностью дальнейшего использования в задачах математической обработки входных сигналов. *Вывод.* Обоснована информационная технология в задачах обработки сигнала ОЭС и предварительного проектирования объектов для перспективных и имеющихся комплексов с МР. Сегодня многофункциональные МР с многоспектральными ОЭС используют сигналы в привязке к объектам и конкретной местности их применения, в качестве телекоммуникационных каналов приема/передачи информации может использоваться радио- или оптическая связь. Отметим также, что более 80 % всего парка МР в мире имеют в своем составе информационно-измерительные и управляющие системы с многоспектральными ОЭС. Выявление первичных оценок измерений к основным показателям и основных характеристик ОЭС является одним из ключевых этапов по разработке проекта для комплекса многофункциональных МР с оценкой технического уровня.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная и управляющая система, оптико-электронная система, состав, информационно-управляющая система, информационно-аналитическая система, структура, распознающее устройство, мобильные роботы, алгоритмическое и аппаратно-программное обеспечение ИИУС

**Для цитирования:** Полтавский А. В., Григорьев А. В., Мельничук А. И., Избасов А. Г., Рыбаков И. М. Оптимизация моделей объектов информационно-измерительных и управляющих систем мобильных роботов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 28–38. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-4

## OPTIMIZATION OF MODELS OF OBJECTS OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF MOBILE ROBOTS

A.V. Poltavsky<sup>1</sup>, A.V. Grigoriev<sup>2</sup>, A.I. Melnichuk<sup>3</sup>, A.G. Izbasov<sup>4</sup>, I.M. Rybakov<sup>5</sup>

<sup>1</sup> V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>3</sup> Training aviation base of the Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Rtishchevo, Saratov region, Russia

<sup>4</sup> Military Institute of Air Defense Forces named after twice Hero of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan

<sup>1</sup> avp57avp@yandex.ru, <sup>2</sup> a\_grigorev@mail.ru, <sup>3</sup> pelmenio@mail.ru, <sup>4</sup> iag1973@mail.ru, <sup>5</sup> rybakov\_im@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The purpose of the work is to consider one of the possible approaches to modifying models and algorithms for information processing in relation to information-measuring and control systems (IIUS) of mobile robots (MR). The composition of the IIUS is the core for modern information management systems (IUS) as one of the main components for technical cybernetics. *Materials and methods.* Methods, models and implementing operating algorithms for the preliminary design of IIUS objects with the development of modern computer-aided design systems for these objects by a multifunctional BWS with an assessment of the main quality indicators and functional efficiency, including a set of analytical design information models, allow them to be connected to dynamic modules of the information and analytical system (IAS) as a modern information design. *Results.* As an object of research, the IIUS from the multispectral optoelectronic system (ECO) of an unmanned aircraft is considered. An approach and operating algorithms are proposed to implement the task of processing ECO signals with the possibility of further use in problems of mathematical processing of input signals. *Conclusion.* The information technology in the tasks of signal processing of the ECO and preliminary design of facilities for promising and existing complexes with MR is substantiated. Today, multifunctional MR with multispectral ECO use signals in connection with objects and a specific area of their application, radio or optical communication can be used as telecommunication channels for receiving/transmitting information. It should also be noted that more than 80 % of the entire UAV fleet in the world includes information-measuring and control systems with multispectral ECO. Identification of primary measurement estimates for the main indicators and the main characteristics of the ECO is one of the key stages in the development of a project for a complex of multifunctional MR with an assessment of the technical level.

**Keywords:** information-measuring and control system, optoelectronic system, composition, information-control system, information-analytical system, structure, recognition device, mobile robots, algorithmic and hardware-software of IIUS

**For citation:** Poltavsky A.V., Grigoriev A.V., Melnichuk A.I., Izbasov A.G., Rybakov I.M. Optimization of models of objects of information-measuring and control system of mobile robots. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):28–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-4

### Введение

В настоящий период времени большинство задач исследования [1] и оптимизации динамических систем непосредственно связано с разработками объектов для беспилотных систем и комплексов, которые интенсивно развиваются. Многие постановки и подобные задачи для этих, прежде всего, динамических систем, как правило, сводятся к разработке обоснованных методов их решения и информационных моделей, которые являются неотъемлемой частью в современных сложных информационных конструкциях. Реализующие подходы к проблеме идентификации и оптимизации моделей объектов для информационно-измерительных и управляющих систем могут быть разными (также по уровням и решаемым задачам для ИИУС), но как основной составной части в сетевой информационно-управляющей системе (ИУС), а также и связанных блоков для системы автоматического управления (САУ) беспилотного воздушного судна (МР – это БПЛА) эти подходы требуют применения научных методов в анализе и синтезе именно на начальной стадии зарождения системы [1, 2]. Одним из вариантов на этом множестве путей для поисковых исследований и раннего решения ряда оптимизационных задач выступают задачи, которые предусматривают сравнение (сличение) реального выходного сигнала  $Y$  динамической системы с сигналом желаемым (требуемым)  $Y_T$ . По существу, это также означает то, что в основу поисковых исследований и оптимизации объектов, а также и информационных процессов положены признаки, которые связаны с функционированием системы ИИУС. Следовательно, за качество [3] системы ИИУС здесь принимается ее эффективность, точнее, условная эффективность. В состав блоков модели и принимаемых ограничений (условий) включаются требования к процессу формирования  $Y$ . Требуемый сигнал вида  $Y_T$  задается из объективных возможностей (и принимаемых ограничений в информационном моделировании) и целевого назначения системы. Сам желаемый сигнал  $Y_T$  может быть эталоном (базовым сигналом), а формально связь входного  $X$  и выходного  $Y$  сигналов можно записать с помощью оператора  $A(Y, X; t)$ :

$$Y = A(Y, X; t)X.$$

Создаваемая сложная информационная конструкция и информационно-аналитическая система ИАС, состоящая из динамических модулей и моделей объектов ИИУС, имеет многоуровневое и иерархическое управление (подчиненность нижестоящих подсистем вышестоящим),

которое подчинено достижению главной цели, поставленной перед всей системой [4]. В заданных границах информационного моделирования ИИУС каждая подсистема, а также объект и каждый элемент проявляют локальную независимость. Видоизменять информационную конструкцию в ИАС можно путем замены некоторых управляющих звеньев для объектов ИИУС, которые будем характеризовать, как и прежде, управляющей матрицей  $S_c$ . Физически элементами матрицы  $S_c$  могут быть численные значения некоторых параметров, а также и события. Подчеркивая зависимость выходного сигнала системы ИИУС от управляющей матрицы, еще раз запишем информационную модель для модулей информационной конструкции ИАС в следующем виде:

$$Y(S_c) = A(Y, X, S_c; t)X.$$

Основная задача, стоящая перед объектами для модели ИИУС, – управление качеством (сближение  $Y$  и  $Y_T$ ). Чтобы придать отклонениям  $Y$  от  $Y_T$  свойство для измеримости, будем пользоваться функцией потерь  $\ell(Y, Y_T)$ . Задавая назначение системы  $Y_T$  оптимизационным критерием

$$\min \rho = \min M[\ell(Y, Y_T)],$$

на его реализации могут быть сформулированы основные ограничения (условия), которые обеспечивают физическую осуществимость оптимальной системы ИИУС. Оптимизация связана с сравнительным анализом для значений  $\rho$ , что требует проведения многократных опытов, если опытом в компьютерном моделировании назвать совокупность из действий, в результате которых для данной реализации входного сигнала  $X(t)$  ИИУС ставится в соответствие одна реализация для выходного сигнала  $Y(t)$ . Для реализации опыта нужна реальная система ИИУС или адекватная процессам информационная модель. Опыт с реальной системой становится целесообразным тогда, когда лицам ЛПП или самим исследователям принципиально необходимо учесть основные конструктивные, а также энергетические и некоторые эксплуатационные особенности системы. Как правило, целью таких опытов, как ранее отмечено, является доводка уже готовой системы до состояния наилучшего в смысле принятого критерия качества. В свою очередь, опыты с моделями являются более доступными, более экономичными, а иногда и единственно возможными. К преимуществам информационного моделирования относится также и то, что при этом создается возможность контроля непосредственно за каждым элементом процесса любой сложности. Процесс информационного моделирования ИИУС состоит в создании целой цепочки: системы–аналога и среды–аналога. В основу построения моделей ИИУС для многоцелевых МР, а также описания условий их работы и применения положены [5] «идентичность формы» уравнений и однозначность соотношений между переменными.

### Модель и ИИУС идентификации сигналов

Построение моделей для многих ИУС связано с предварительным анализом их структуры, а также возможных вариантов для их проектирования [6]. Описание подхода исследования оптимизации моделей объектов ИИУС в составе МР в следующем. Задана динамическая система – ИИУС (как ядро для ИУС), на вход которой действуют входные сигналы вида  $X_1(U_1; t)$ ,  $X_2(U_2; t)$ , ...,  $X_r(U_r; t)$ . Функции [7] на входе  $X_\mu(U_\mu; t)$ , ( $\mu = \overline{1, r}$ ) являются случайными функциями времени, а векторные случайные величины  $U_r$  характеризуют возможную регулярность функций  $X_r(U_r; t)$  (в частном случае функции  $X_r(U_r)$  могут и не зависеть от времени). Свойства системы зависят от блочной управляющей матрицы  $S_c$ :

$$S_c = \begin{Bmatrix} S_{c_1} \\ S_{c_2} \end{Bmatrix},$$

где элементами  $S_v^{(1)} (v = \overline{1, N_s})$  матрицы  $S_{c_1} = \begin{Bmatrix} S_1^{(1)} \\ S_2^{(1)} \\ \vdots \\ S_{N_s}^{(1)} \end{Bmatrix}$  являются параметры для управляющих звеньев. В свою очередь, матрица

$$S_{c2} = \left\| \begin{matrix} C_1^{(2)} \\ C_2^{(2)} \\ \vdots \\ C_M^{(2)} \end{matrix} \right\|$$

с элементами  $C_i^{(2)} (i = \overline{1, M})$  – сложные события, они отвечают следующим требованиям:

$$\prod_{i=1}^M C_i^{(2)} = C, P(C) = 1, \sum_{j_i=1}^{n_i} C_{j_i}^{(2)} = C_i^{(2)}; \prod_{j_i=1}^{n_i} C_{j_i}^{(2)} = \emptyset; P(\emptyset) = 0 \text{ и } \sum_{j_i=1}^{n_i} P(C_{j_i}^{(2)}) = 1.$$

Первое требование свидетельствует о совместности событий  $C_i^{(2)} (i = \overline{1, M})$ , второе о том, что каждое событие  $C_i^{(2)} (i = \overline{1, M})$  является сложным, третьему требованию соответствует несовместность для событий  $C_{j_i}^{(2)} (j_i = \overline{1, n_i})$ , четвертое говорит о полной группе событий  $C_{j_i}^{(2)} (j_i = \overline{1, n_i})$ . Задача данной системы в том, чтобы обеспечить максимум события

$$\theta = \sum_{\mu=1}^r \theta_{\mu}, \tag{1}$$

в котором  $\theta_{\mu}$  – несовместные события, состоящие в выполнении всей совокупности из требований, предъявляемых к системе ИИУС при входных сигналах  $X_{\mu}(U_{\mu;t})$ . Учитывая несовместность событий  $\theta_{\mu}$ , получим следующую формулу:

$$P(\theta) = \sum_{\mu=1}^r P(\theta_{\mu}). \tag{2}$$

Задачу, связанную с исследованием и оптимизацией системы, можно решить путем выбора из всех элементов для матрицы  $S_c$ , т.е. моделируемых элементов, при которых  $S_c = S_o$  с обеспечением критерия

$$P(\theta) = P(\theta/S_o) = \max. \tag{3}$$

Принимая управляющую матрицу как  $S_c = S_o$ , динамическая система (в среднем) по входным сигналам  $X_{\mu}(U_{\mu;t})$  обеспечивает максимум вероятности  $P(\theta/S_c)$ , сама система ИИУС при этом будет иметь постоянную структуру. Эффективность по критерию для максимальной вероятности  $P(\theta)$  и выполнения всех основных требований, связанных с регистрацией сигнала  $X_{\mu}(U_{\mu;t})$ , в модели ИИУС можно также повысить, если в состав ее блоков включить распознающее устройство, способное отличать сигналы  $X_{\mu}(U_{\mu;t})$  друг от друга. При фиксированной матрице  $S_c = S_o$  вероятность  $P(\theta/S_o) = \sum_{\mu=1}^r P(\theta_{\mu}/S_o)$ , при этом нет уверенности в том, что каждый член этой суммы будет принимать максимальное значение. Значение для  $P(\theta)$  может возрасти, если обеспечить

$$P(\theta) = \sum_{\mu=1}^r P(\theta_{\mu}/S_{\mu_o}),$$

где  $P(\theta_{\mu}/S_{\mu_o})$  – максимальная вероятность события  $\theta$  при появлении  $\mu$ -го сигнала на входе системы ИИУС и оптимальных для сигнала значений  $S_c = S_{\mu_o}$ . Таким образом, на вход для распознающего устройства поступает сигнал  $X_{\mu}(U_{\mu;t})$ . В соответствии с образом для входного

сигнала  $X_\mu(U_{\mu}; t)$  и сигналом для блока выбора решений имеется программируемый «переключающий» ключ  $K_p$  в автоматизированной ИАС, он осуществляет подключение одного из моделируемых каналов системы (рис. 1). В свою очередь, свойства для каналов и моделей объектов ИИУС в ИАС определяются оператором  $B_v(S_{v_i}), (v = \overline{1, m})$ :

$$Sv_1 = \begin{pmatrix} S_{v_1}^{(1)} \\ S_{v_2}^{(1)} \\ \vdots \\ S_{v_{N_{Sv}}}^{(1)} \end{pmatrix},$$

в котором  $v$  – фиксированное значение для матрицы  $S_{c_2}$ .

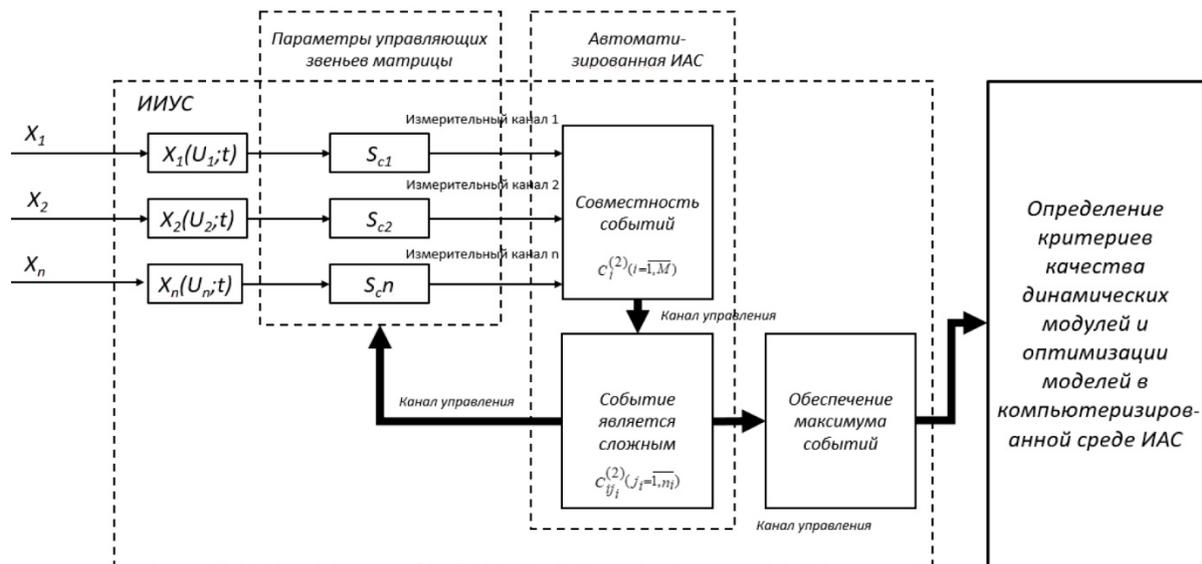


Рис. 1. Автоматизированная информационно-измерительная и управляющая система для оптимизации моделей объектов мобильных роботов

Рассмотрим идеальный случай, когда распознающее устройство в модели ИИУС и блок выбора решений работают без ошибок. Требуется определить матрицу  $S\mu_0 (\mu = \overline{1, r})$ , т.е. найти оптимальное решение (оптимальную матрицу  $S_{c2}$ ) и оптимальные параметры подключенного в результате принятого решения канала в ИИУС (найти оптимальную матрицу  $S_{c1}$ ) при принятом ранее условии, что на информационный вход действуют сигналы  $X_\mu(U_\mu; t), (\mu = \overline{1, r})$ . Критерием качества динамических модулей и оптимизации моделей в компьютеризированной среде ИАС будем считать максимум для вероятности  $P(\theta) = \max$ , критерий также применяется в распознавании образов [8]. Для решения задачи в компьютеризированной среде ИАС воспользуемся методом неградиентного случайного поиска Д. И. Гладкова. Рассмотрим систему, в которой матрица  $S_{c2}$  имеет в качестве своих составных элементов сложные события  $c_1^{(2)}$  и  $c_2^{(2)}$ . На одном из уровней для ИИУС (пусть это первый уровень) происходит распознавание сигналов  $X_\mu(U_\mu; t)$ . При этом фиксируются события:  $C_{11}^{(2)}$  – на вход действует сигнал  $X_1(U_1; t)$ ;  $C_{12}^{(2)}$  – на вход системы действует сигнал  $X_2(U_2; t)$ ; ...,  $C_{1r}^{(2)}$  – на вход системы действует сигнал  $X_r(U_r; t)$ . На втором уровне системы алгоритмом принимаются решения о подключении определенного канала в модели для ИИУС. При этом здесь происходят основные события, определяющие состояние системы в информационном моделировании:  $C_{21}^{(2)}$  – подключен первый

канал  $B_1(S_{11})$ ;  $C_{22}^{(2)}$  – подключен второй канал  $B_2(S_{21})$ ;  $C_{2v}^{(2)}$  – подключен  $v$ -й канал  $B_v(S_{v1})$ ;  $C_{2m}^{(2)}$  – подключен  $m$ -й канал  $B_m(S_{m1})$ .

Матрица  $S_{c_2}$  имеет следующий вид:

$$S_{c_2} = \left\| \begin{matrix} C_1^{(2)} \\ C_2^{(2)} \end{matrix} \right\|. \quad (4)$$

Свойства для матрицы  $S_{c_2}$  характеризуются на основе

$$A_{\mu v} = C_{1\mu}^{(2)} C_{2v}^{(2)}, \quad (5)$$

где  $C_{1\mu} (\mu = \overline{1, r})$  – события, определяющие образ входного сигнала в модели объектов для ИИУС; компонента  $C_{2v}$  – события, определяющие состояние системы ( $v = \overline{1, m}$ ). Присутствие одного элемента от каждой строки матрицы (4) обязательно. Это обстоятельство вытекает из требования о совместимости событий  $C_i^{(2)} (i = 1, 2)$ . В свою очередь, каждое событие  $A_{\mu v}$  определяет одно из возможных фиксированных состояний матрицы  $S_{c_2}$ . В процессе информационного случайного поиска все элементы для матрицы  $S_c$  будут также случайными. При фиксированном состоянии матрицы  $S_c \Rightarrow \Xi_c$  случайные элементы заменяются их реализациями. Случайность для  $C_{12}^{(2)}, \dots, C_{12}^{(2)}$  определяется по входным сигналам в модели ИИУС. Реализация  $C_{11}^{(2)}, \dots, C_{1\mu}^{(2)}$  определяется алгоритмами поиска. Определяя управляющую матрицу  $S_c$  и событие  $\theta_\mu$ , запишем плотности

$$P(A_{\mu v}) f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu v}) P(\theta_\mu / A_{\mu v}; \Xi_{c_1}) = P(\theta_\mu) P(A_{\mu v} / \theta_\mu) f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu v}; \theta_\mu), \quad (6)$$

где  $P(A_{\mu v})$  – вероятность события  $A_{\mu v}$ ;  $f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu v})$  – плотность вероятности матрицы  $\Xi_{c_1}$  при фиксированном состоянии матрицы  $\Xi_{c_2}$ ;  $P(\theta_\mu / A_{\mu v}; \Xi_{c_1}) = P(\theta_\mu / \Xi_{c_1})$  – вероятность события  $\theta_\mu$ , при фиксации элементов для матрицы  $\Xi_{c_2}$ ;  $P(A_{\mu v} / \theta_\mu)$  – вероятность события  $A_{\mu v}$ , при условии, что имеет место  $\theta_\mu$ ;  $f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu v}; \theta_\mu)$  – плотность вероятности матрицы  $\Xi_{c_1}$ , при фиксированном состоянии для  $\Xi_{c_2}$  и при условии, что имеет место событие  $\theta_\mu$ . Из данного равенства находим

$$P(\theta_\mu / A_{\mu v}; \Xi_{c_1}) = P(\theta_\mu) \frac{P(A_{\mu v} / \theta_\mu) f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu v}; \theta_\mu)}{P(A_{\mu v}) f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu v})}. \quad (7)$$

Вероятность  $P(\theta_\mu)$  не зависит от  $A_{\mu v}$  и значений элементов матрицы  $\Xi_{c_1}$ , тогда можно утверждать, что максимальному значению вероятности

$$P(\theta_\mu / A_{\mu v}; \Xi_{c_1}) = P(\theta_\mu / S_{\mu_0}) \quad (8)$$

соответствует наибольший из максимумов рассматриваемых функций, т.е. имеем

$$F_{\mu v}(A_{\mu v}; \Xi_{c_1}) = \frac{P(A_{\mu v} / \theta_\mu) f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu v}; \theta_\mu)}{P(A_{\mu v}) f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu v})}. \quad (9)$$

Таким образом, при организации случайного поиска без самообучения в блоке для апостериорной информации необходимо формировать  $f_\theta(\Xi_{c_1} / A_{\mu v}; \theta_\mu)$ ,  $P(A_{\mu v} / \theta_\mu)$ , а также находить  $\sup_{A_{\mu v} \Xi_{c_1}} F_{\mu v}(A_{\mu v}; \Xi_{c_1})$ , поиск с самообучением следует организовать на основе зависимостей следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} P(A_{\mu\nu}n+1) &= P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}; n), \\ f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; n+1) &= f_{\theta}(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; \theta_{\mu}; n), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где  $P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}; n)$  – вероятность события  $A_{\mu\nu}$  на  $n$ -м сеансе поиска, при условии, что имело место событие  $\theta_{\mu}$ ;  $P(A_{\mu\nu}; n+1)$  – вероятность события  $A_{\mu\nu}$  на  $(n+1)$ -м сеансе поиска,  $f_{\theta}(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; \theta_{\mu}; n)$  – плотность вероятности для матрицы  $\Xi_{c_1}$  на  $n$ -м сеансе поиска, при условии, что уже произошли события  $\theta_{\mu}$  и  $A_{\mu\nu}$ ;  $f_{c_1}(\Xi_{c_1} / A_{\mu\nu}; n+1)$  – плотность вероятности для матрицы  $\Xi_{c_1}$  на  $(n+1)$ -м сеансе поиска при фиксированном событии  $A_{\mu\nu}$ . Вероятностные характеристики, которые относятся к  $n$ -му сеансу поиска являются апостериорными, а к  $(n+1)$ -му сеансу случайного поиска – априорными. Практически имеем выражения к построению алгоритма в информационной конструкции:

$$\left. \begin{aligned} M_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1) &= M_{\theta_{\mu}}(A_{\mu\nu}; n), \\ K_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1) &= K_{\theta_{\mu}}(A_{\mu\nu}; n), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $M_{\theta_{\mu}}(A_{\mu\nu}; n)$  – апостериорная матрица из математических ожиданий,  $K_{\theta_{\mu}}(A_{\mu\nu}; n)$  – апостериорная матрица корреляционных моментов связи для параметров управляющих звеньев объектов для ИИУС, при которых имело место событие  $\theta_{\mu}$ ;  $M_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1), K_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1)$  – априорные матрицы из математических ожиданий и корреляционных моментов связи параметров управляющих звеньев. Матрица параметров формируется по следующим правилам:

$$\Xi_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1) = M_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1) + \Gamma_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; n+1)\Xi_{\Gamma_2}, \quad (\mu = \overline{1, r}; \nu = \overline{1, m}),$$

где  $\Gamma_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; n+1)$  – треугольная матрица с элементами, функционально связанными с элементами  $K_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1)$ . Матрица  $\Xi_{\Gamma_2} : M[\Xi_{\Gamma_2}] = 0; K_{\Gamma_2} = M[\Xi_{\Gamma_2}\Xi'_{\Gamma_2}] = E; E \in R(0;1)$ .

Автоматизация и организация поиска в конструкции ИАС [9, 10] процедурами нейронной сети с самообучением заключается в следующем. В блоки  $(\Gamma, M_{c_1})$  поступает вся апостериорная информация. На выходы в информационной среде ИАС пропускаются (в зависимости от события  $A_{\mu\nu}$ ) только значения элементов матриц  $\Gamma_{\mu\nu}(A_{\mu\nu}; n+1)$  и  $M_{c_1}(A_{\mu\nu}; n+1)$ , далее в блок  $L_{\mu\nu}$  поступает значение для вероятности  $P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu})$ . Автоматически в ИАС корректируется виртуальная длина из каждой части для  $\mu$ -го единичного отрезка

$$L_{\mu\nu}(n+1) = P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}; n), \quad (12)$$

где  $P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}; n)$  – вероятность события  $A_{\mu\nu}$ , при условии, что имело место событие  $\theta_{\mu}$ , определяемая в процессе информационного поиска. Процесс случайного поиска в модели ИИУС в ИАС производится в последовательности. В соответствии с сигналом  $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ , поступающим на вход системы, распознающее устройство фиксирует событие  $C_{1\mu}^{(2)}$ . Далее сигнал  $C_{1\mu}^{(2)}$  поступает в блок  $L_{\mu\nu}$ , где непосредственно находятся  $r$  единичных отрезков, каждый из которых «разбит» на  $m$  частей. Моделируемый в блоке  $L_{\mu\nu}$   $\mu$ -й отрезок поступает в блок  $A_{\mu\nu}$ . Генератор-задатчик  $S_{\Gamma_1}$ , который представляет собой встроенный датчик для псевдослучайных чисел, он воспроизводит случайную величину, имеющую закон (встроенный датчик случайных чисел) распределения вида

$$f(\Xi_{\Gamma_1}) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < \Xi_{\Gamma_1} < 1, \\ 0 & \text{при } \Xi_{\Gamma_1} < 0; \Xi_{\Gamma_1} > 1. \end{cases}$$

В блоке  $A_{\mu\nu}$  происходит определение, на какую часть для  $\mu$ -го отрезка непосредственно попала случайная величина  $\Xi_{\Gamma_1}$ . Попадание величины на  $\nu$ -ю часть  $\mu$ -го отрезка означает то, что есть факт фиксации для события  $A_{\mu\nu}$ . В соответствии с этим событием блок выбора решений подключает  $\nu$ -й канал. Генератор  $\Xi_{\Gamma_2}$  формирует реализацию из значений для матрицы  $\Xi_{\Gamma_2}$ . На выходе из информационного блока наблюдается сигнал  $Y_{\mu\nu}(t) = B_{\nu}[\Xi_{\nu 1}, X_{\mu}(U; t)]$ . В блоке сличения ИАС для  $\theta_{\mu}$  происходит его сравнение с сигналом, требуемым  $Y_{T\mu}(t)$ . Если требования удовлетворены, срабатывает управляющий ключ (программа)  $K_{\theta}$  и в информационный блок  $S_o$  поступают значения для элементов управляющей матрицы  $\Xi_c$ , соответствующие сеансу поиска. Если известна вероятность  $P_{\mu}$  входных сигналов  $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ , то факт события  $A_{\mu\nu}$  можно установить с помощью одного единичного отрезка. Отрезок разделен на  $r$  частей, а длина  $L_{\mu}$   $\mu$ -й части отрезка равна вероятности  $P_{\mu}(\mu = \overline{1, r})$ . Попадание случайной величины  $\Xi_{\Gamma_1}$  на виртуальный отрезок  $L_{\mu}$  будет свидетельствовать о появлении на входе ИИУС входного сигнала  $X_{\mu}(U_{\mu}; t)$ . Отрезок  $L_{\mu}(\mu = \overline{1, r})$  в программе делится на  $m$  отрезков  $L_{\mu\nu}(\nu = \overline{1, m})$  с целью удовлетворения вероятностей

$$\frac{L_{\mu\nu}}{L_{\mu}} = P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}). \tag{13}$$

Величина  $L_{\mu} = P_{\mu}$ , ее можно определить следующим образом:

$$L_{\mu\nu}(n+1) = L_{\mu} P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu}; n). \tag{14}$$

В алгоритмах по идентификации моделей ИИУС попадание случайной величины  $\Xi_{\Gamma_1}$  на виртуальный отрезок  $L_{\mu\nu}$  свидетельствует о том, что имеет место событие  $A_{\mu\nu}$ , окончанием поиска в компьютеризированной ИАС принята мера приращения матрицы математических ожиданий параметров:

$$\frac{1}{n_p} \sum_{i=0}^{n_p} \left| \frac{H_{n_{y-i}} - H_{n_{y-i-1}}}{H_{n_{y-i}}} \right| \leq \epsilon_p, \tag{15}$$

где  $H_{n_{y-i}}$  – норма матрицы  $M_{\theta}$  на  $n_{y-i}$ -м сеансе поиска;  $n_p$  – интервал усреднения;  $\epsilon_p$  – заданное число, определяющее меру для приращения матрицы  $M_{\theta}$ , характеризующее стационарность информационного процесса. При оптимизации решений стационарность процесса поиска также является сигналом к окончанию поиска. При неустановившемся режиме поиска оптимальные решения в среде ИАС будут находится из формулы

$$\frac{P(A_{\mu\nu} / \theta_{\mu})}{P(A_{\mu\nu})}. \tag{16}$$

Оценкой оптимальных параметров объектов в модели ИИУС при симметричной апостериорной плотности вероятности  $f_{\theta}(\Xi_{c_1} / \theta_{\mu})$  является

$$S_{\mu\nu_0} = M \left[ \Xi_{c_i} / A_{\mu\nu}; \theta_{\mu} \right]. \quad (17)$$

В итоге результатом поиска наилучшей модели в ИИУС являются оптимальные решения  $a_{\mu\nu_0}$  для каждого вида моделируемых входных сигналов. А также одновременно определяются значения параметров управляющих звеньев  $S_{\mu\nu_0}$ , которые вводятся, а затем также фиксируются в аппаратно-программной среде ИАС.

### Заключение

Важное практическое значение имеют разработки из информационных конструкций для ИИУС, основанные на математических моделях. Автоматизация сложных процессов управления в информационных блоках беспилотных авиационных систем приводит к необходимости использования различных моделей для систем в ИИУС с переменной структурой как мультиструктурной прежде всего. Анализ и сами исследования таких сложных технических систем часто [11] основаны на теоретико-множественных и логико-вероятностных подходах для рассмотрения динамики системы в пространстве состояний. Одной из основных и главных задач для ИИУС в МР является задача поиска сигнала (источника сигнала) и его сопровождения (слежения). Эта задача достаточно комплексная. Направления моделирования систем с современными информационными технологиями и разработки для автоматизации объектов информационных процессов направлены, прежде всего, на комплексирование задач, обоснование методов, моделей и алгоритмов к многокритериальному оцениванию показателей качества и технического уровня объектов ИИУС с целью выбора наилучших альтернатив. Они также предлагают и различные подходы к идентификации объектов в БАС. Известные положения из теории исследования операций предполагают комплексный набор – ряд из методов и способов формирования единого критерия  $J(\cdot)$  ИИУС как набора из частных критериев  $J_i$ . Метод введения (учета) ограничений в информационной конструкции на выходные параметры в форме их для «свертки» позволяет решать многие задачи анализа и оптимизации. Преобразование задачи оптимизации в ИИУС с ограничениями в задачу оптимизации без ограничений путем изменения целевой функции является базисом и основой для целой группы методов, часто также еще называемых методами штрафных функций. Алгоритмы поиска лучших параметров и лучших решений (особенно на ранней стадии их предварительного анализа, проектирования и контроля испытаний) для объектов ИИУС в информационной конструкции методом НСП наряду с известными методами экспертных оценок могут дать не только оптимальные решения к выбору моделей для систем и объектов современным МР, но и указать на меру их конкурентоспособности в соответствии с принятым условием для критерия, формируемого из набора основных показателей качества и функциональной эффективности всей. Создание сложных информационных конструкций с основными блоками к модели ИИУС для разных типов компьютеризированных информационно-аналитических систем (ИАС), как правило, двойного назначения позволяет ЛПР выработать более объективные решения при построении современных систем управления и систем наведения беспилотных воздушных судов. Важно и то, что данный подход к поисковым исследованиям и оптимизации моделей объектов беспилотной техники может дополняться основными компонентами также современных технологий – технологий построения геоинформационных систем (ГИС). В настоящее время различные виды ГИС-технологий интенсивно развиваются, особенно это видно при построении современных информационных моделей для объектов беспилотных транспортных систем (морских надводных, наземных, подземных, подводных и космических), связанных также с алгоритмами и переработкой пространственно-временных данных.

### Список литературы

1. Гладков Д. И. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском. М. : Энергоиздат, 1984. 256 с.
2. Гришко А. К., Лапшин Э. В., Полтавский А. В. [и др.]. Основы управления в радиоэлектронных системах : учеб. пособие. Пенза, 2016.
3. Казаков И. Е., Мальчиков С. В. Анализ стохастических систем в пространстве состояний. М. : Наука, 1983. 384 с.

4. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления : учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 211 с.
5. Жумабаева А. С., Полтавский А. В., Юрков Н. К. К проблеме модельного синтеза комплексов беспилотных летательных аппаратов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 73–81.
6. Кульба В. В., Микрин Е. Н., Павлов Б. В., Платонов В. Н. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов // Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. М. : Наука, 2006. 579 с.
7. Полтавский А. В. Модель измерительной системы в управлении БПЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 10. С. 73–77.
8. Гладков Д. И., Полтавский А. В. Информационный аспект маневренного противодействия антиракетам // Проблемы повышения эффективности УАСП : сб. тр. НММ ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского. М., 1996. 128 с.
9. Полтавский А. В., Бурба А. А., Русяева Е. Ю. Оптико-электронная система мониторинга окружающего пространства // Изобретательство. 2012. Т. 12. № 8. С. 28–31.
10. Полтавский А. В., Юрков Н. К., Неведьев Д. И., Гриншкун А. В. Информационная модель распознавания образов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 2. С. 114–117.
11. Дремлюга Г. П., Есин С. А., Иванов Ю. А., Ляшенко В. А. Беспилотные летательные аппараты. Состояние и тенденции развития / под общ. ред. Ю. Б. Иванова. М. : Варяг, 2004. 176 с.

### References

1. Gladkov D.I. *Optimizatsiya sistem negradientnym sluchaynym poiskom = Optimization of systems by non-gradient random search*. Moscow: Energoizdat, 1984:256. (In Russ.)
2. Grishko A.K., Lapshin E.V., Poltavskiy A.V. et al. *Osnovy upravleniya v radioelektronnykh sistemakh: ucheb. posobie = Fundamentals of control in radio-electronic systems : a textbook*. Penza, 2016. (In Russ.)
3. Kazakov I.E., Mal'chikov S.V. *Analiz stokhasticheskikh sistem v prostranstve sostoyaniy = Analysis of stochastic systems in the state space*. Moscow: Nauka, 1983:384. (In Russ.)
4. Semenov A.D., Artamonov D.V., Bryukhachev A.V. *Identifikatsiya ob"ektov upravleniya: ucheb. posobie = Identification of management objects : a textbook*. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003:211. (In Russ.)
5. Zhumabaeva A.S., Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. On the problem of model synthesis of unmanned aerial vehicle complexes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1):73–81. (In Russ.)
6. Kul'ba V.V., Mikrin E.N., Pavlov B.V., Platonov V.N. Theoretical foundations of designing information and control systems of spacecraft. *Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN = V.A. Trapeznikov Institute of Control Problems of the Russian Academy of Sciences*. Moscow: Nauka, 2006:579. (In Russ.)
7. Poltavskiy A.V. Model of a measuring system in UAV control. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and control systems*. 2009;(10):73–77. (In Russ.)
8. Gladkov D.I., Poltavskiy A.V. Informational aspect of maneuverable counteraction to anti-missile. *Problemy povysheniya effektivnosti UASP: sb. tr. NMM VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo = Problems of increasing the effectiveness of UASP : sb. tr. NMM VVIA named after prof. N.E. Zhukovsky*. Moscow, 1996:128. (In Russ.)
9. Poltavskiy A.V., Burba A.A., Rusaeva E.Yu. Optical-electronic monitoring system of the environment pro-wanderings. *Izobretatel'stvo = Invention*. 2012;12(8):28–31. (In Russ.)
10. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K., Nefed'ev D.I., Grinshkun A.V. Information model of pattern recognition. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;2:114–117. (In Russ.)
11. Dremlyuga G.P., Esin S.A., Ivanov Yu.A., Lyashenko V.A. *Bespilotnye letatel'nye apparaty. Sostoyanie i tendentsii razvitiya = Unmanned aerial vehicles. The state and trends of development*. Moscow: Varyag, 2004:176. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Александр Васильевич Полтавский

доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН (Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)  
E-mail: avp57avp@yandex.ru

#### Aleksandr V. Poltavsky

Doctor of technical sciences, senior researcher, leading researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences (65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)  
E-mail: avp57avp@yandex.ru

**Алексей Валерьевич Григорьев**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: a\_grigorev@mail.ru

**Антон Иванович Мельничук**

инженер группы обслуживания  
и ремонта бортовой  
контрольно-записывающей аппаратуры,  
Учебная авиационная база Краснодарского  
высшего военного авиационного училища  
летчиков МО РФ  
(Россия, Саратовская область,  
г. Ртищево, ул. Котовского 1/1)  
E-mail: pelmenio@mail.ru

**Аскар Гадылшиевич Избасов**

заместитель начальника,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
имени дважды Героя Советского Союза  
Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе,  
пр-т Алии Молдагуловой 39)  
E-mail: iag1973@mail.ru

**Илья Михайлович Рыбаков**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rybakov\_im@mail.ru

**Aleksey V. Grigoriev**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Anton I. Melnichuk**

Engineer of the on-board control and recording  
equipment maintenance and repair group,  
Training aviation base of the Krasnodar Higher  
Military Aviation School of Pilots of the Ministry  
of Defense of the Russian Federation  
(1/1 Kotovsky street, Rtishchevo,  
Saratov region, Russia)

**Askar G. Izbasov**

Deputy head,  
Military Institute of Air Defense Forces  
named after twice Hero  
of the Soviet Union T.Ya. Begeldinov  
(39 Aliya Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

**Илья М. Rybakov**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 27.01.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 27.02.2023**

**Принята к публикации/Accepted 24.03.2023**

УДК 004.932.2  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-5

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВИБРОНАГРУЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕТКИ

**Н. С. Реута**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
saparap@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Показана необходимость создания систем диагностики для вибронгруженных объектов. Отмечено, что бесконтактные системы обладают достаточными возможностями для определения амплитуды вибраций. Показано, что анализ последовательностей изображения с камеры позволяет оценить параметры вибрации. *Материалы и методы.* Предложены механизмы анализа изображения с камеры путем подсчета строк и пикселей при измерении радиуса изображения круглой метки. Проведено численное моделирование процессов измерения радиуса изображения круглой метки методом подсчета строк и пикселей с различными параметрами. *Результаты.* Моделирование показало, что выигрыш в точности при применении технологии подсчета пикселей по отношению к технологии подсчета строк будет возрастать по мере увеличения радиуса изображения метки. *Вывод.* Прогнозируется снижение предельной абсолютной погрешности измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей при увеличении радиуса изображения метки.

**Ключевые слова:** вибрация, измерение, размытие, изображение, площадь изображения, погрешность, пиксель

**Для цитирования:** Реута Н. С. Информационно-измерительная система диагностики технического состояния вибронгруженных объектов на основе анализа размытия изображения метки // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 39–52. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-5

## INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF VIBRATION-LOADED OBJECTS BASED ON THE ANALYSIS OF THE IMAGE BLUR OF THE MARK

**N.S. Reuta**

Penza State University, Penza, Russia  
saparap@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The necessity of creating diagnostic systems for vibration-loaded objects is shown. It is noted that non-contact systems have sufficient capabilities to determine the vibration amplitude. It is shown that the analysis of image sequences from the camera makes it possible to estimate the vibration parameters. *Materials and methods.* Mechanisms for analyzing the image from the camera by counting lines and pixels when measuring the radius of the image of a round mark are proposed. Numerical modeling of the processes of measuring the radius of the image of a round mark using technologies for counting lines and pixels with different parameters was carried out. *Result.* Simulations have shown that the accuracy gain of applying the pixel counting technology to the line counting technology will increase as the label image radius increases. *Conclusion.* It is predicted that the maximum absolute error in measuring the radius of the mark image using the pixel counting technology will decrease with an increase in the radius of the mark image.

**Keywords:** vibration, measurement, blur, image, image area, error, pixel

**For citation:** Reuta N.S. Information-measuring system for diagnostics of the technical condition of vibration-loaded objects based on the analysis of the image blur of the mark. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):39–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-5

### **Введение**

Вращающиеся части, входящие в состав современного оборудования, со временем изнашиваются, при этом изменяется частотный спектр и амплитуда вибрации, в результате по этим

параметрам можно отследить деградиационные процессы. Для таких измерений применяют контактные и бесконтактные информационно-измерительные системы вибродиагностики.

### *Контактная виброметрия*

В основе контактных методов лежит непосредственный механический контакт датчика измерительной системы с вибрирующим объектом и наличие контактной массы. В процессе вибрации датчик, расположенный между вибрирующим объектом и контактной массой, деформируется, величина этой деформации преобразуется в сигнал, физическая природа которого позволяет его обрабатывать с целью получения информации о параметрах вибрации. Чаще всего это аналоговый электрический сигнал, который может быть преобразован в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя.

Существует множество способов измерения деформаций, например, тензорезистивный, волоконно-оптический, пьезоэлектрический.

Инерционность контактной массы ограничивает частотный диапазон механических контактных датчиков. В результате верхний предел частоты вибраций, воспринимаемых такими системами, составляет единицы килогерц. Этого явно недостаточно для того, чтобы удовлетворить современным требованиям вибродиагностики. Диапазоны частот вибраций машин и механизмов выходят далеко за эти рамки. В качестве примера на рис. 1 представлен спектр частот вибрации авиационного двигателя НК-8 [1].

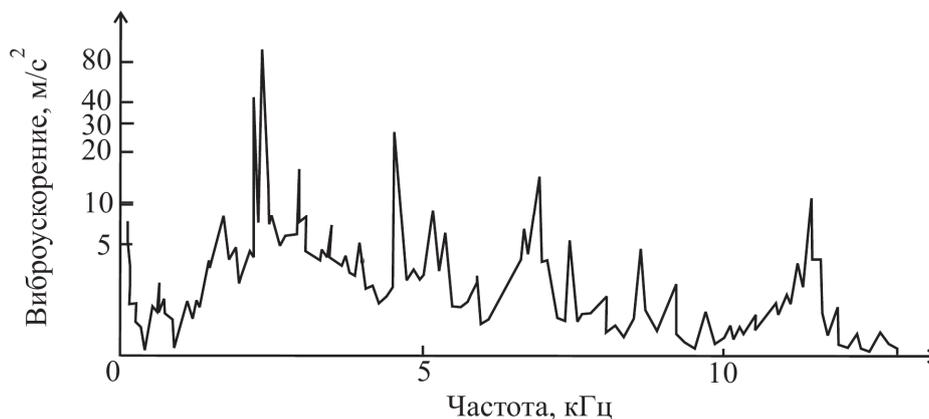


Рис. 1. Спектр высокочастотной вибрации двигателя НК-8

Виброизмерительная система, предназначенная для диагностики скрытых дефектов этого двигателя, должна измерять вибрации частотой 12 кГц с относительной погрешностью, не превышающей  $\pm 5\%$ . Ни один из известных контактных датчиков такие измерения не поддерживает. Авиационная и космическая техника подвергается вибрационным воздействиям, частота которых достигает сотен килогерц.

### *Лазерная виброметрия*

Принцип работы лазерного виброметра основан на доплеровском сдвиге частоты оптического (лазерного) излучения, отраженного от движущегося объекта. В этом случае применяют метод оптического гетеродинирования отраженного от объекта слабого оптического сигнала на основе двухлучевой интерференционной оптической схемы с последующим формированием квадратурных компонент электрического сигнала фотодетекторами балансного типа. Микропроцессоры, входящие в состав лазерного виброметра, производят цифровую обработку и анализ вибрационных сигналов. Результаты в виде спектрограмм или осциллограмм отображаются на экране внешнего компьютера [2].

Лазерные виброметры являются бесконтактными средствами измерения вибраций. Поэтому они свободны от недостатков, присущих средствам контактной виброметрии. Они не влияют на резонансные свойства объектов, обеспечивают возможность измерений без предварительной подготовки поверхности объекта и оперативное измерение амплитуды вибраций в различных точках объекта.

### **Широкополосная оптическая виброметрия**

Известен способ измерения размаха вибрации объекта, включающий закрепление на объекте тест-объекта, выполненного в виде мерного клина, и регистрацию изображения тест-объекта с вибрационным размытием, которую осуществляют посредством визуальной фиксации точки пересечения крайних положений мерного клина на определенном расстоянии от острия. Основание мерного клина градуируют и оцифровывают в миллиметрах размаха вибрации. Измерение проводят при вибрации с частотой 8 Гц и выше в направлении вверх-вниз [3].

Недостатками описанного способа являются узкая область применения вследствие определения одного параметра – размаха вибрации и неширокий диапазон измерения значений амплитуды вибрации, ограниченный в определении наименьших значений размаха зависимостью от длины и высоты мерного клина, а также низкая точность измерения, обусловленная погрешностями визуальной фиксации.

Описанный способ также является бесконтактным. Ему несвойственны недостатки методов и средств контактной виброметрии, рассмотренные выше. По сравнению с методами лазерной виброметрии методы широкополосной оптической виброметрии являются более экономичными. Верхний частотный предел средств оптической широкополосной виброметрии неограничен.

### **Широкополосные оптические методы измерения амплитуды вибраций, использующие размытие изображения круглой метки**

Сущность оптического метода измерения вибрации, использующего размытие изображения, заключается в том, что на поверхность объекта контроля наносится метка круглой формы. Регистрируется изображение этой метки. В качестве регистрирующего устройства обычно применяется цифровая фото- или видеокамера.

Метод позволяет измерять не только величину, но и направление вибрационного перемещения исследуемой материальной точки. Это обусловлено тем, что используется размытое (вследствие воздействия вибрации) изображение круглой метки. По направлению этого размытия судят о проекции вектора вибрационного перемещения на плоскость объекта (абсциссе и ординате вектора) [4, 5].

В работе [6] показано, что измерительным сигналом перемещения исследуемой материальной точки по аппликате является приращение радиуса размытого вследствие вибрации изображения метки по отношению к радиусу четкого ее изображения, предварительно полученного при отсутствии вибрации. В работе [7] представлена технология измерения геометрических параметров как размытого, так и четкого изображения метки, в основу которой положено измерение расстояний от пикселей, входящих в состав изображения до центра тяжести изображения метки. Эти расстояния получили название характеристических расстояний. В работе [8] проведено моделирование двух предельных ситуаций: когда исследуемая материальная точка перемещается исключительно в плоскости объекта и когда она перемещается исключительно в направлении, перпендикулярном плоскости объекта. В работе [9] моделируется ситуация, когда исследуемая материальная точка совершает вибрационное перемещение в плоскости, перпендикулярной плоскости объекта, по периметру эллипса, одна из осей которого лежит в плоскости объекта. При этом направление оси эллипса в плоскости объекта выбрано произвольно. В работе [10] рассмотрена структура методики измерения параметров вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки на основе анализа размытого вследствие вибрации изображения круглой метки. Там же представлена методика измерения радиуса круглого изображения путем формирования матрицы характеристических расстояний входящих в его состав пикселей. В статьях [11, 12] изложен вариант построения системы бесконтактного векторного измерения вибрационных перемещений посредством анализа вибрационного размытия изображения круглой метки. В работе [13] изложена методика калибровки системы трехкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа размытия изображения круглой метки, т.е. методика определения коэффициентов перевода растровых единиц изображения в микрометры вибрационного перемещения. Под растровой единицей (*Raster unit, run*) понимается единица измерения длины на растровом изображении, определяемая расстоянием между центрами соседних в строке или столбце пикселей<sup>1</sup>. В работе [14] показано, что

<sup>1</sup> ГОСТ 27459-87. Системы обработки информации. Машинная графика. Термины и определения.

анализ размытого вследствие вибрации изображения круглой метки подразделяется на следующие этапы: формирование структурного описания размытого вследствие вибрации изображения круглой метки [15]; анализ этого описания [16]; вычисление модуля и компонент вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки, расположенной в центре оригинала метки, который нанесен на объект контроля [17–20]. Исследования, результаты которых опубликованы в статьях [18–22], заключались в том, что получали четкое изображение метки при отсутствии вибрации, а затем, не меняя параметров фокусировки фотокамеры, приближали ее к объекту контроля. Установлено значимое увеличение радиуса изображения круглой метки за счет эффекта расфокусировки при статическом приближении оригинала метки к регистрирующему устройству.

### *Технология измерения радиуса изображения круглой метки*

На рис. 2 представлена структурная схема системы измерения амплитуды вибраций на основе анализа геометрических параметров изображения круглой метки.

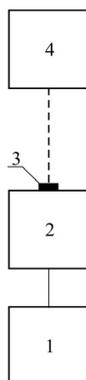


Рис. 2. Структурная схема системы измерения вибраций на основе анализа изображения круглой метки

На вибростенде 1 устанавливается объект контроля 2, на который нанесена круглая метка 3. Регистрирующее устройство 4, в качестве которого может быть использована, например, цифровая фотокамера, создает исходное изображение метки (преобразует аналоговое, непрерывное изображение в дискретное, цифровое), модель которого представлена на рис. 3.

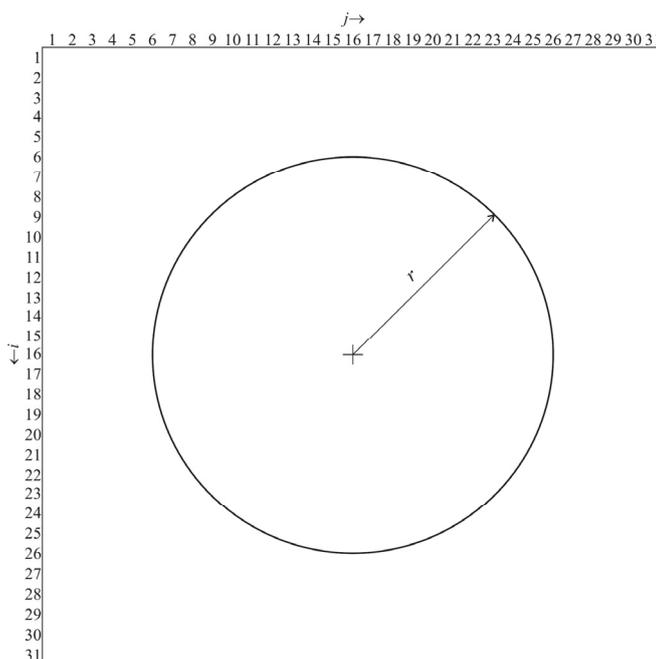


Рис. 3. Модель исходного изображения круглой метки

На этом рисунке радиус исходного изображения круглой метки обозначен через  $r$ . Это изображение преобразуется фотоприемной матрицей регистрирующего устройства в дискретное изображение, доступное для дальнейшей обработки в цифровом виде.

На рис. 3 и далее индекс  $i$  – порядковый номер строки матрицы,  $j$  – порядковый номер столбца матрицы. Эти же индексы являются координатными осями. В соответствии с принятым в области обработки изображений координатным соглашением [23], значение вертикальной координаты  $i$  ставится на первое место, а значение горизонтальной координаты  $j$  – на второе. В результате вертикальная координата  $i$  считается абсциссой, а горизонтальная  $j$  – ординатой. После цифровой камеры получается изображение круглой метки, показанное на рис. 4.

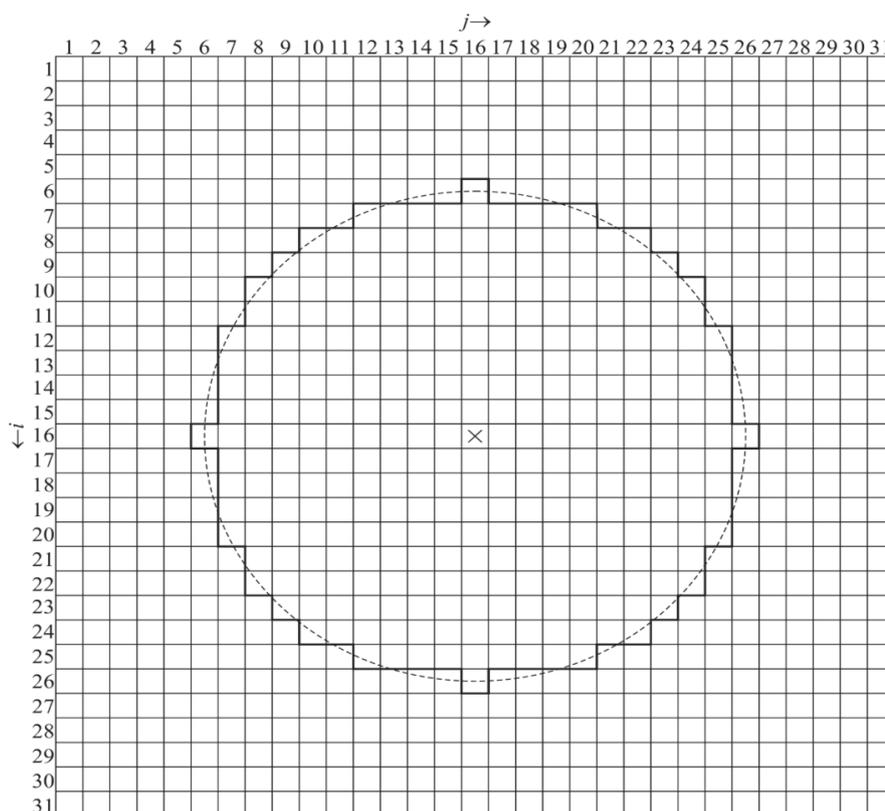


Рис. 4. Модель дискретизации изображения круглой метки

На этом рисунке пунктирной линией показан контур истинного (аналогового) изображения круглой метки, а контур измеренного дискретного изображения этой метки показан сплошной основной линией. Если геометрический центр пикселя в процессе дискретизации находится в пределах истинного изображения, то весь пиксель включается в состав дискретного изображения. Если же геометрический центр пикселя находится за пределами истинного изображения, то весь пиксель остается за пределами дискретного изображения.

#### **Моделирование процесса измерения радиуса изображения круглой метки**

При моделировании истинное значение радиуса изображения круглой метки  $r$  изменяется от  $9,5run$  до  $10,5run$  включительно. Размеры пикселя  $5 \times 5$  мм. Размеры растровой матрицы  $(31 \times 31)run$ . Предполагается, что центр изображения метки совпадает с центром пикселя, для которого  $i = 16$ ;  $j = 16$ . Измерение параметров круглой метки (количество пикселей по осям) осуществляется для радиусов, при которых нарастающее истинное исходное изображение метки захватывает новые пиксели. На растровых диаграммах обозначены диагонали этих новых пикселей. Центр исходного изображения метки обозначен символом «x».

Растровая диаграмма изображения круглой метки при  $r = 9,5run$  представлена на рис. 5.

Количество  $n_i$  строк растровой матрицы, пересекающих изображение метки при моделировании удобно определять по формуле

$$n_l = i_{\min_{\max}}, \quad (1)$$

где  $i_{\max}$  и  $i_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значения порядкового номера строки, имеющей в своем составе хотя бы один пиксель изображения метки.

Таким образом:

$$n_l = i_{\min_{\max}}.$$

Значение  $r_{cl}$  радиуса изображения метки, измеренное методом подсчета строк, определяется по формуле

$$r_{cl} = \frac{n_l}{2} \cdot 1run = \frac{19}{2} \cdot 1run = 9,5run.$$

Погрешность результата измерения радиуса понимается как разность между измеренным и опорным значениями измеряемой величины<sup>1</sup>. В качестве опорного значения радиуса  $r$  метки выступает принятое значение  $r$ , которое задается

$$\varepsilon_{rcl} = r_{cl} - r, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{rcl}$  – погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета строк.

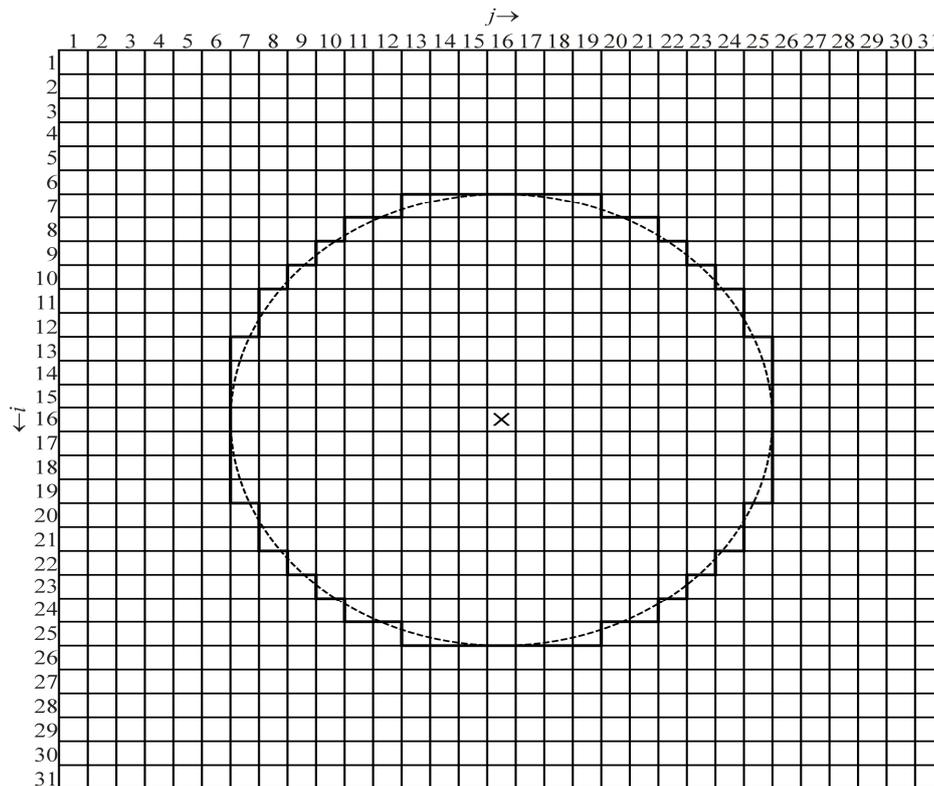


Рис. 5. Растровая диаграмма изображения метки при  $r = 9,5run$

Принятое значение  $S$  площади изображения метки определится по формуле

$$S = \pi r^2. \quad (3)$$

Таким образом:

$$S = \pi r^2 = \pi 9,5^2 run^2 = 90,25\pi run^2 \approx 283,5run^2.$$

<sup>1</sup> РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения.

Процесс накопления количества пикселей изображения метки  $n_p$  построчно представлен в табл. 1.

Таблица 1

Процесс накопления  $n_p$  построчно при  $r = 9,5run$

$i$	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\sum_{k=i}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$	7	11	13	15	17	17	19	19	19	19
$\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$	7	18	31	46	63	80	99	118	137	156
$i$	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
$\sum_{k=i}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$	19	19	19	17	17	15	13	11	7	
$\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$	175	194	213	230	247	262	275	286	293	

Таким образом,  $n_p = 293$ .

Далее произведем подсчет средней площади:

$$S_{cp} = n_p \cdot 1run^2 = 293 \cdot 1run^2 = 293run^2.$$

В качестве опорного значения радиуса площади изображения метки принимается истинное ее значение  $S$ , которое вычисляется по формуле (3). Погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей определится по следующей формуле:

$$\epsilon_{Scp} = S_{cp} - S, \tag{4}$$

где  $\epsilon_{Scp}$  – погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей.

Таким образом:

$$\epsilon_{Scp} = S_{cp} - S = 293run^2 - 90,25\pi run^2 = 9,47run^2.$$

Измеренное методом подсчета пикселей значение радиуса изображения метки определим по формуле

$$r_{cp} = \sqrt{\frac{S_{cp}}{\pi}} = \sqrt{\frac{293run^2}{\pi}} = 9,66run.$$

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей определится следующим образом:

$$\epsilon_{rcp} = r_{cp} - r, \tag{5}$$

где  $\epsilon_{rcp}$  – погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей.

Таким образом:

$$\epsilon_{rcp} = r_{cp} - r = 9,66run - 9,5run = 0,16run.$$

При  $r = 9,85run$  нарастающее исходное изображение метки захватывает центры новых периферийных пикселей. При  $r = (9,85-0)run$  новые периферийные пиксели еще не включены в состав дискретного изображения метки, но исходное изображение метки  $r$  уже равно  $9,85run$ . Из этого следует, что все измеренные значения остаются прежними:  $n_l = 19$ ;  $r_{cl} = 9,5run$ ;  $n_p = 293$ ;  $S_{cp} = 293run^2$ ;  $r_{cp} = 9,66run$ .

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета строк  $\epsilon_{rccl}$  определится по формуле (2):

$$\epsilon_{rccl} = r_{cl} - r = 9,5run - 9,85run = -0,35run.$$

Истинное значение  $S$  площади изображения метки определится по формуле (3):

$$S = \pi r^2 = \pi \cdot 9,85^2 \text{ run}^2 = 97,02\pi \text{ run}^2 \approx 304,8 \text{ run}^2 .$$

Погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей  $\epsilon_{Scp}$  определится по формуле (4):

$$\epsilon_{Scp} = S_{cp} - S = 293 \text{ run}^2 - 97,02\pi \text{ run}^2 = -11,81 \text{ run}^2 .$$

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей  $\epsilon_{rcp}$  определится по формуле (5):

$$\epsilon_{rcp} = r_{cp} - r = 9,66 \text{ run} - 9,85 \text{ run} = -0,19 \text{ run} .$$

Растровая диаграмма изображения круглой метки при  $r = 9,85 \text{ run}$  представлена на рис. 6.

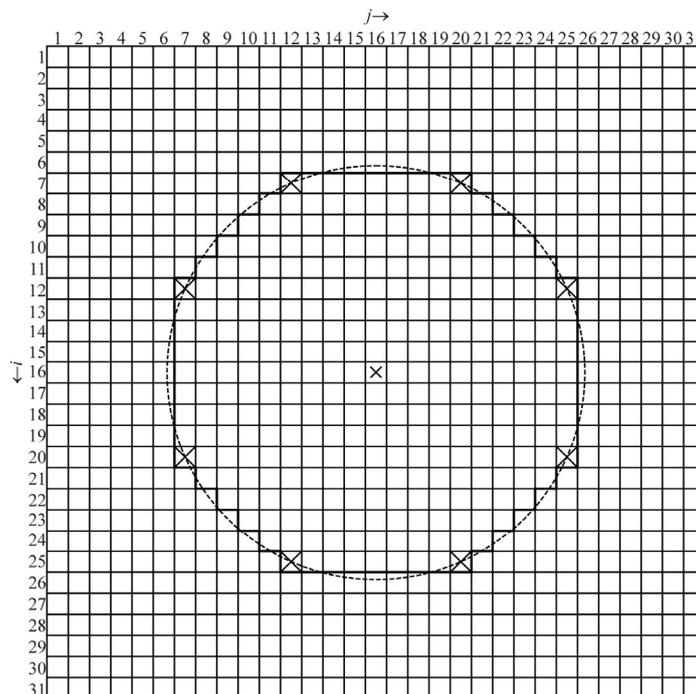


Рис. 6. Растровая диаграмма изображения метки при  $r = 9,85 \text{ run}$

Количество  $n_l$  строк растровой матрицы, пересекающих изображение метки при моделировании определится по формуле (1):

$$n_l = i \min_{\max} .$$

Значение  $r_{cl}$  радиуса изображения метки, измеренное методом подсчета строк, определяется по формуле

$$r_{cl} = \frac{n_l}{2} \cdot 1 \text{ run} = \frac{19}{2} \cdot 1 \text{ run} = 9,5 \text{ run} .$$

Погрешность результата измерения  $r_{cl}$  определится по формуле (2):

$$\epsilon_{rcl} = r_{cl} - r = 9,5 \text{ run} - 9,85 \text{ run} = -0,35 \text{ run} .$$

Истинное значение  $S$  площади изображения метки определится по формуле (3):

$$S = \pi r^2 = \pi \cdot 9,85^2 \text{ run}^2 = 97,02\pi \text{ run}^2 \approx 304,8 \text{ run}^2 .$$

Процесс накопления количества пикселей изображения метки  $n_p$  построчно представлен в табл. 2.

Таблица 2

Процесс накопления  $n_p$  построчно при  $r = 9,85run$

$i$	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\sum_{k=i}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$	9	11	13	15	17	19	19	19	19	19
$\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$	9	20	33	48	65	84	103	122	141	160
$i$	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
$\sum_{k=i}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$	19	19	19	19	17	15	13	11	9	
$\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^J \xi(i, j)$	179	198	217	236	253	268	281	292	301	

Таким образом,  $n_p = 301$ .  
В соответствии с формулой

$$S_{cp} = n_p \cdot 1run^2 = 301 \cdot 1run^2 = 301run^2 .$$

Погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей определится по формуле (4):

$$\epsilon_{Scp} = S_{cp} - S = 301run^2 - 97,02\pi run^2 = -3,8run^2 .$$

Измеренное методом подсчета пикселей значение радиуса изображения метки определится по формуле

$$r_{cp} = \sqrt{\frac{S_{cp}}{\pi}} = \sqrt{\frac{301run^2}{\pi}} = 9,79run .$$

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей определится по формуле (5):

$$\epsilon_{rcp} = r_{cp} - r = 9,79run - 9,85run = -0,06run .$$

При  $r = 9,9run$  нарастающее исходное изображение метки захватывает центры новых периферийных пикселей. При  $r = (9,9-0)run$  новые периферийные пиксели еще не включены в состав дискретного изображения метки, но исходное изображение метки  $r$  уже равно  $9,9run$ . Из этого следует, что все измеренные значения остаются прежними:  $n_l = 19$ ;  $r_{cl} = 9,5run$ ;  $n_p = 301$ ;  $S_{cp} = 301run^2$ ;  $r_{cp} = 9,79run$ .

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета строк  $\epsilon_{rccl}$  определится по формуле

$$\epsilon_{rccl} = r_{cl} - r = 9,5run - 9,9run = -0,4run .$$

Истинное значение  $S$  площади изображения метки определится по формуле (3):

$$S = \pi r^2 = \pi \cdot 9,9^2 run^2 = 98,01\pi run^2 \approx 307,9run^2 .$$

Погрешность результата измерения площади изображения метки методом подсчета пикселей  $\epsilon_{Scp}$  определится по формуле

$$\epsilon_{Scp} = S_{cp} - S = 301run^2 - 98,01\pi run^2 = -6,91run^2 .$$

Погрешность результата измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей  $\epsilon_{rcp}$  определится по формуле (5):

$$\epsilon_{rcp} = r_{cp} - r = 9,79run - 9,9run = -0,11run .$$

Аналогичным образом производится расчет показателей для радиусов до 10. Результаты расчетов сведены в табл. 3–5.

### Анализ результатов моделирования

В табл. 3 количество строк  $n_l$ , пересекающих исходное изображение метки, представлено как функция истинного радиуса изображения метки  $r$ .

Таблица 3

Количество строк, пересекающих изображение метки,  
как функция радиуса этого изображения

$r, run$	9,5	9,55	9,6	9,65	9,7	9,75	9,8	<b>9,85</b>	<b>9,9</b>	9,95	<b>10</b>
$n_l$	19	19	19	19	19	19	19	<b>19</b>	<b>19</b>	19	<b>21</b>
$r, run$	<b>10,05</b>	10,1	10,15	<b>10,2</b>	10,25	<b>10,3</b>	10,35	10,4	<b>10,45</b>	10,5	
$n_l$	<b>21</b>	21	21	<b>21</b>	21	<b>21</b>	21	21	<b>21</b>	21	

В табл. 3 исходное изображение метки нарастает с шагом  $0,05run$  от  $9,5run$  до  $10,5run$ . Центр изображения круглой метки совпадает с центром пикселя. Поэтому при  $r = 10run$  изображение круглой метки одновременно захватывает двенадцать центров пикселей. В числе этих центров пикселей центры пикселей столбца растровой матрицы, для элементов которого  $j = 16$ , относящиеся к ее строкам, для одной из которых  $i = 6$ , а для другой и  $i = 26$ . В результате, когда истинный непрерывный радиус изображения метки  $r$  достигает значения  $r = 10run$ ,  $n_l$  скачкообразно увеличивает свое значение сразу на две единицы: от 19 до 21 (рис. 7).

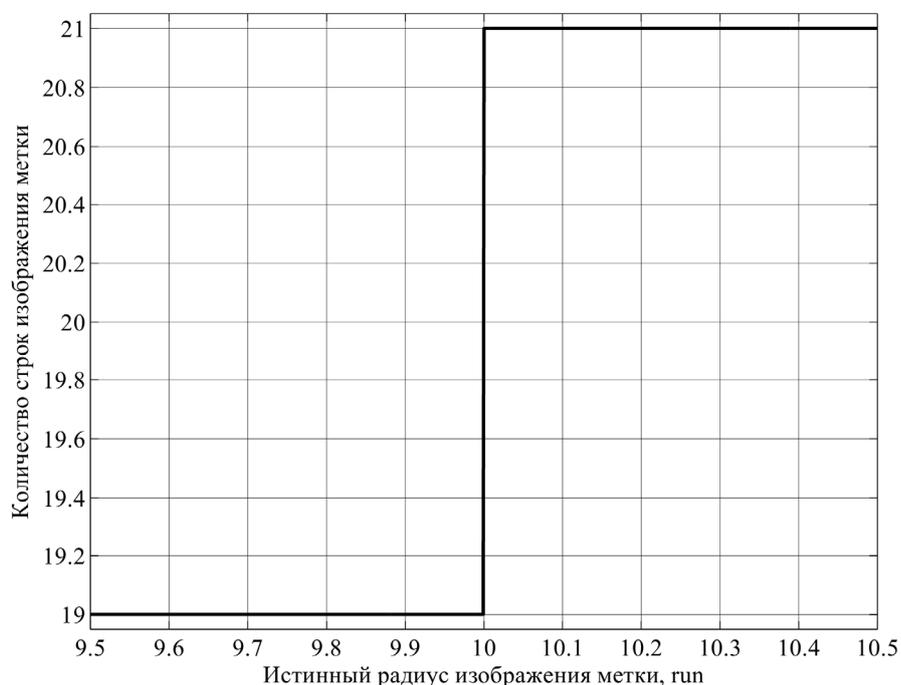


Рис. 7. Количество строк, пересекающих изображение круглой метки,  
как функция радиуса этого изображения

В табл. 4 количество пикселей  $n_p$ , принадлежащих изображению метки, представлено как функция истинного радиуса изображения метки  $r$ .

Таблица 4

Количество пикселей, принадлежащих изображению метки,  
как функция радиуса этого изображения

$r, run$	9,5	9,55	9,6	9,65	9,7	9,75	9,8	<b>9,85</b>	<b>9,9</b>	9,95	<b>10</b>
$n_l$	293	293	293	293	293	293	293	<b>301</b>	<b>305</b>	305	<b>317</b>
$r, run$	<b>10,05</b>	10,1	10,15	<b>10,2</b>	10,25	<b>10,3</b>	10,35	10,4	<b>10,45</b>	10,5	
$n_l$	<b>325</b>	325	325	<b>333</b>	333	<b>341</b>	341	341	<b>349</b>	349	

Количество пикселей изображения метки  $n_p$  скачкообразно увеличивает свое значение при тех значениях радиуса изображения метки, при которых нарастающее исходное изображение круглой метки захватывает новые центры пикселей (рис. 8).

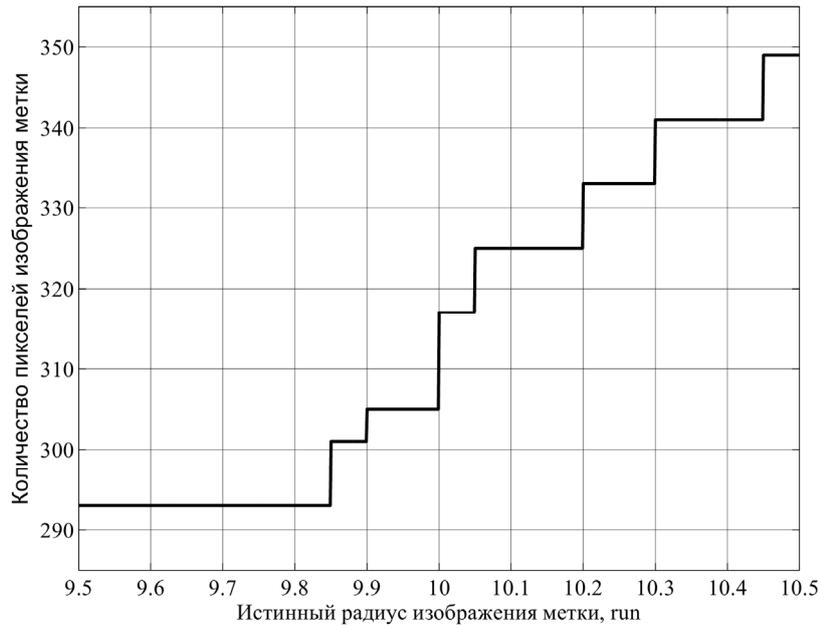


Рис. 8. Количество пикселей, составляющих изображение круглой метки, как функция радиуса этого изображения

Поскольку центр изображения круглой метки совпадает с центром пикселя, а круг является фигурой центрально симметричной, при одном и том же истинном значении радиуса изображения метки либо вообще не захватывает новых периферийных пикселей, либо захватывает не один и не два, а, по меньшей мере, четыре пикселя. Количество добавленных пикселей при каждом захвате представлено в табл. 5

Таблица 5

Количество добавленных пикселей при каждом их захвате нарастающим исходным изображением метки

<i>r, run</i>	9,5	9,85	9,9	10	10,05	10,2	10,3	10,45	10,5
Добавилось пикселей	0	8	4	12	8	8	8	8	0

Наименьшее ненулевое количество добавленных пикселей реализовалось при  $r = 9,9$ . Оно равно 4. В результате на рис. 8 значению  $r = 9,9run$  соответствует минимальная ступень значения  $n_p$  – количества пикселей изображения метки. Наибольшее количество добавленных пикселей реализовалось при  $r = 10$ . Оно равно 12. В результате на рис. 8 значению  $r = 10run$  соответствует максимальная ступень значения  $n_p$  – количества пикселей изображения метки. При значениях радиуса изображения метки:  $r = 9,85$ ;  $r = 10,05$ ;  $r = 10,2$ ;  $r = 10,3$ ;  $r = 10,45$ . Этим значениям на рис. 8 соответствуют средние по величине ступени.

### Заключение

Проведенные расчеты показали, что среднеквадратичное значение погрешности результата измерения радиуса изображения круглой метки методом подсчета строк  $\sigma_{rcl} = 0,29run$ . Тот же показатель при измерении той же величины методом подсчета пикселей:  $\sigma_{rep} = 0,08run$ .

Оценка выигрыша в точности измерения радиуса изображения круглой метки  $k_{\sigma_{rep}}$  определится по формуле

$$k_{\sigma_{rep}} = \frac{\sigma_{rcl}}{\sigma_{rep}},$$

где  $k_{\sigma_{rep}}$  – оценочный коэффициент выигрыша в точности измерения радиуса изображения круглой метки методом подсчета пикселей по отношению к измерению той же величины методом подсчета строк.

В рассматриваемой модели:

$$k_{\text{српл}} = \frac{\sigma_{\text{rel}}}{\sigma_{\text{срп}}} = \frac{0,29\text{run}}{0,08\text{run}} = 3,62.$$

Таким образом, моделирование показало, что при истинном значении радиуса изображения метки  $r = 10\text{run}$  выигрыш в точности измерения радиуса изображения круглой метки при применении технологии подсчета пикселей по отношению к измерению той же величины при применении технологии подсчета строк превышает 3,6 раза.

При применении технологии подсчета строк погрешность результата измерения не зависит от целого числа растровых единиц, составляющих радиус изображения метки. В зависимости от дробной части этого числа и от положения центра тяжести изображения метки по отношению к центру пикселя погрешность результата измерения радиуса изображения круглой метки методом подсчета строк варьируется в пределах  $\pm 0,5\text{run}$ .

Поскольку скачкообразные изменения погрешности результата измерения вызваны захватами новых центров пикселей нарастающим исходным изображением круглой метки, выигрыш в точности при применении технологии подсчета пикселей по отношению к технологии подсчета строк будет возрастать по мере увеличения радиуса изображения метки. Прогнозируется также снижение предельной абсолютной погрешности измерения радиуса изображения метки методом подсчета пикселей при увеличении радиуса изображения метки. Этот показатель будет также снижаться с ростом площади изображения метки или, что фактически то же самое, с ростом количества пикселей, приходящихся на изображение метки.

#### Список литературы

1. Киселев Ю. В. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники. Самара : СГАУ, 2010.
2. Лазерные измерители вибрации виброметры. URL: [http://coolreferat.com/Лазерные\\_измерители\\_вибрации\\_виброметры](http://coolreferat.com/Лазерные_измерители_вибрации_виброметры) (дата обращения: 17.07.2022).
3. Иориш Ю. М. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Машгиз, 1963.
4. Пат. RU 2535237 Способ измерения вибраций / Држевецкий А. Л., Юрков Н. К., Григорьев А. В., Затылкин А. В., Кочегаров И. И., Кузнецов С. В., Држевецкий Ю. А., Деркач В. А. № 2013128327/28 ; заявл. 20.06.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
5. Пат. RU 2535522 Способ измерения вибраций / Држевецкий А. Л., Юрков Н. К., Григорьев А. В., Затылкин А. В., Кочегаров И. И., Кузнецов С. В., Држевецкий Ю. А., Деркач В. А. № 2013128329/28 ; заявл. 20.06.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
6. Grigor'ev A. V., Goryachev N. V., Yurkov N. K. Way of measurement of parameters of vibrations of mirror antennas // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 : proceedings. 2015. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147031
7. Grigor'ev A. V., Grishko A. K., Goryachev N. V. et al. Contactless three-component measurement of mirror antenna vibrations // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 : proceedings. 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673
8. Григорьев А. В., Трусов В. А., Баннов В. Я. [и др.]. Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее компланарном и ортогональном виброперемещениях // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 106–109.
9. Григорьев А. В., Юрков Н. К., Кочегаров И. И. [и др.]. Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее произвольном виброперемещении // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 109–112.
10. Григорьев А. В., Данилова Е. А., Бростилов С. А. [и др.]. Структура методики измерения параметров вибраций по следу вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 13–16.
11. Успанов М. Ж., Кармишин В. С., Савельев Н. Д. [и др.]. Особенности структурного описания центрально асимметричного следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Современные информационные технологии. 2016. № 24. С. 83–89.
12. Григорьев А. В., Кармишин В. С., Кузина Е. А. [и др.]. Анализ вибрационного центрально-асимметричного размытия изображения круглой метки // Научно-техническая конференция НИУ ВШЭ им. Е. В. Арменского : материалы конференции. М., 2017. С. 223–224.
13. Григорьев А. В., Алмаметов В. Б., Долотин А. И. [и др.]. Методика калибровки системы трехкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 16–19.

14. Григорьев А. В., Юрков Н. К., Трусов В. А., Баннов В. Я. Структура методики анализа следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. № 2. С. 28–31.
15. Григорьев А. В., Затылкин А. В., Лысенко А. В., Таньков Г. В. Формирование и описание отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. № 2. С. 31–37.
16. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Бростилов С. А., [и др.]. Анализ отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. № 2. С. 37–41.
17. Григорьев А. В., Гришко А. К., Лапшин Э. В. [и др.]. Вычисление выходных параметров системы измерения модуля и компонент вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки объекта контроля // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. № 2. С. 41–44.
18. Grigoriev A. V., Yurkov N. K., Kochegarov I. I. Contactless Measurement Technique for the Amplitude of Vibrational Movement of the Test Material Point // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016). P. 549–551.
19. Grigoriev A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K. et al. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring mechanisms // Procedia Computer Science, 2021. – P. 736–742. DOI: 10.1016/j.procs.2021.04.215
20. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Конъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 3. С. 56–66.
21. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Дизъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 106–113.
22. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Способ контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 55–63.
23. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде *MATLAB*. М. : Техносфера, 2006.

### References

1. Kiselev Yu.V. *Vibratsionnaya diagnostika sistem i konstruktsiy aviatsionnoy tekhniki = Vibration diagnostics of systems and structures of aviation equipment*. Samara: SGAU, 2010. (In Russ.)
2. *Lazernye izmeriteli vibratsii vibrometry = Laser vibration meters vibrometers*. (In Russ.). Available at: [http://coolreferat.com/Lazernye\\_izmeriteli\\_vibratsii\\_vibrometry](http://coolreferat.com/Lazernye_izmeriteli_vibratsii_vibrometry) (accessed 17.07.2022).
3. Iorish Yu.M. *Vibrometriya. Izmerenie vibratsii i udarov. Obshchaya teoriya, metody i pribory. Izd. 2-e, pererab. i dop. = Measurement of vibration and shock. General theory, methods and devices. 2nd ed., reprint. and additional*. Moscow: Mashgiz, 1963. (In Russ.)
4. Patent RU 2535237. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatylnkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach V.A. № 2013128327/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
5. Patent RU 2535522. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatylnkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach V.A. № 2013128329/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
6. Grigor'ev A.V., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Way of measurement of parameters of vibrations of mirror antennas. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015: proceedings*. 2015. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147031
7. Grigor'ev A.V., Grishko A.K., Goryachev N.V. et al. Contactless three-component measurement of mirror antenna vibrations. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016: proceedings*. 2016. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673
8. Grigor'ev A.V., Trusov V.A., Bannov V.Ya. et al. Modeling of the blur trace of the image of a circular mark with its coplanar and orthogonal vibration displacements. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;1:106–109. (In Russ.)
9. Grigor'ev A.V., Yurkov N.K., Kochegarov I.I. et al. Modeling of the blur trace of the image of a circular mark with its arbitrary vibration displacement. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;1:109–112. (In Russ.)
10. Grigor'ev A.V., Danilova E.A., Brostilov S.A. et al. The structure of the methodology for measuring vibration parameters by the trace of vibration blurring of the image of a round mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:13–16. (In Russ.)

11. Uspanov M.Zh., Karmishin V.S., Savel'ev N.D. et al. Features of the structural description of the centrally asymmetric trace of vibrational blurring of the image of a round mark. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2016;(24):83–89. (In Russ.)
12. Grigor'ev A.V., Karmishin V.S., Kuzina E.A. et al. Analysis of vibrational centrally asymmetric blurring of the image of a round mark. *Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya NIU VShE im. E.V. Armenskogo: materialy konferentsii = Scientific and Technical Conference of the Higher School of Economics named after E. V. Armensky : conference materials*. Moscow, 2017:223–224. (In Russ.)
13. Grigor'ev A.V., Almametov V.B., Dolotin A.I. et al. Method of calibration of the system of three-component measurement of vibration parameters based on the analysis of the geometry of the trace of vibration blurring of the image of a round mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:16–19. (In Russ.)
14. Grigor'ev A.V., Yurkov N.K., Trusov V.A., Bannov V.Ya. The structure of the methodology for analyzing the trace of vibrational blurring of the image of a round mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;(2):28–31. (In Russ.)
15. Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Lysenko A.V., Tan'kov G.V. Formation and description of the reference segments of the trace of vibration blurring of the image of a round mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;(2):31–37. (In Russ.)
16. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Brostilov S.A. et al. Analysis of the reference segments of the trace of vibrational blurring of the image of a round mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;(2):37–41. (In Russ.)
17. Grigor'ev A.V., Grishko A.K., Lapshin E.V. et al. Calculation of output parameters of the module measurement system and components of the vibration displacement vector of the studied material point of the control object. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;(2):41–44. (In Russ.)
18. Grigoriev A.V., Yurkov N.K., Kochegarov I.I. Contactless Measurement Technique for the Amplitude of Vibrational Movement of the Test Material Point. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*. 2016:549–551.
19. Grigoriev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring mechanisms. *Procedia Computer Science*. 2021:736–742. doi: 10.1016/j.procs.2021.04.215
20. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Conjunctive model of the invariant of the state of the object of control. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2022;(3):56–66. (In Russ.)
21. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Disjunctive model of the invariant of the state of the object of control. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):106–113. (In Russ.)
22. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. A method for monitoring the technical condition of moving mechanisms based on statistical analysis of vibration blurring of the image of a round-shaped test object. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):55–63. (In Russ.)
23. Gonsales R., Vuds R., Eddins S. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v srede MATLAB = Digital image processing in MATLAB*. Moscow: Tekhnosfera, 2006. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Никита Сергеевич Реута**

аспирант,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: saporap@mail.ru

**Nikita S. Reuta**

Postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

**The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 29.02.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 29.03.2023**

**Принята к публикации / Accepted 27.04.2023**

УДК 621.317.799  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-6

## УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧИСЛА ВИТКОВ КАТУШЕК ТРАНСФОРМАТОРОВ

А. И. Нефедьев<sup>1</sup>, А. А. Трофимов<sup>2</sup>, И. В. Самофалов<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

<sup>2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> nefediev@rambler.ru, <sup>2</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>3</sup> sem3436@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В процессе изготовления трансформаторов выполняется множество операций контроля технологических операций, таких как соответствие размеров обмоточного провода, его натяжение, плотность намотки, размеры катушки, расположение и правильность выполнения переходов из одной катушки в другую, направление намотки, качество пайки и изоляции. *Материалы и методы.* Рассмотрены различные устройства, имеющие в своем составе ферромагнитный сердечник с обмоткой возбуждения и эталонной катушкой. Устройства такого типа обычно характеризуются относительно небольшими размерами, что ограничивает максимальный размер контролируемых катушек, и погрешностью от изменения среднего диаметра контролируемых катушек из-за неравномерности магнитного поля в пределах рабочего участка. Важной операцией является проверка количества витков обмоток трансформатора. *Результаты и выводы.* Для повышения точности измерения числа витков катушек индуктивности и расширения функциональных возможностей за счет измерения числа витков обмоток трансформаторов на тороидальных сердечниках после завершения технологической операции намотки было разработано измерительное устройство с погрешностью  $\pm 2$  витка в диапазоне от 100 до 1000 витков и  $\pm 4$  витка в диапазоне до 1000–10000 витков, что позволяет уменьшить количество брака при их производстве.

**Ключевые слова:** трансформатор, обмотка, количество витков, ферромагнитный сердечник, образцовая катушка, контролируемая катушка, погрешность измерения

**Для цитирования:** Нефедьев А. И., Трофимов А. А., Самофалов И. В. Устройства для измерения числа витков катушек трансформаторов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 53–58. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-6

## DEVICES FOR MEASURING THE NUMBER OF TRANSFORMER COILS

A.I. Nefediev<sup>1</sup>, A.A. Trofimov<sup>2</sup>, I.V. Samofalov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

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

<sup>1</sup> nefediev@rambler.ru, <sup>2</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>3</sup> sem3436@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* In the process of manufacturing transformers, many operations are performed to control technological operations, such as matching the size of the winding wire, its tension, winding density, coil dimensions, location and correctness of transitions from one coil to another, winding direction, soldering and insulation quality. *Materials and methods.* Various devices are considered, which include a ferromagnetic core with an excitation winding and a reference coil. Devices of this type are usually characterized by relatively small dimensions, which limits the maximum size of the controlled coils, and by an error from a change in the average diameter of the controlled coils due to the non-uniformity of the magnetic field within the working area. An important operation is to check the number of turns of the transformer windings. *Results and conclusions.* To improve the accuracy of measuring the number of turns of inductors and expand functionality by measuring the number of turns of windings of transformers on toroidal cores after the completion of the winding process, a measuring device was developed with an error of  $\pm 2$  turns in the range from 100 to 1000 turns, and  $\pm 4$  turns in the range up to 1000–10000 turns, which allows to reduce the amount of rejects in their production.

**Keywords:** transformer, winding, number of turns, ferrimagnetic core, reference coil, controlled coil, measurement error

**For citation:** Nefediev A.I., Trofimov A.A., Samofalov I.V. Devices for measuring the number of transformer coils. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):53–58. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-6

В процессе изготовления трансформаторов выполняется множество операций контроля технологических операций, таких как соответствие размеров обмоточного провода, его натяжение, плотность намотки, геометрические размеры катушки, расположение и правильность выполнения переходов из одной катушки в другую, направление намотки, качество пайки и изоляции, контроль активного сопротивления и числа витков. Каждая обмотка перед снятием ее со станка также проверяется на отсутствие межобмоточных замыканий [1, 2].

Важной операцией технического контроля является проверка количества витков обмоток трансформатора. Эту проверку часто проводят при выходном контроле на изготовленном трансформаторе путем сравнения напряжений с аналогичной обмоткой образцового трансформатора. При этом отличие выходных напряжений не должно превышать  $\pm(0,5-1) \%$  в соответствии с ГОСТ 11677-85<sup>1</sup>. Таким образом, операция контроля числа витков в готовой обмотке является важной. Для снижения затрат при изготовлении трансформаторов необходимо производить данную операцию до сборки трансформатора.

Известно много устройств, позволяющих контролировать число витков катушек трансформаторов, электромагнитов и других индуктивных устройств до сборки.

Большинство таких устройств основано на методе сравнения напряжения испытуемой и образцовой катушек, и обычно их конструкция содержит ферромагнитный сердечник, на котором располагаются эталонная катушка, контролируемая катушка и обмотка возбуждения. От особенностей конструкции такого устройства в значительной степени зависят точность измерения числа витков, стабильность показаний, диапазон размеров контролируемых катушек, удобство эксплуатации и ряд других факторов.

Рассмотрим несколько таких устройств, имеющих ферромагнитный сердечник с обмоткой возбуждения и эталонной катушкой. Устройства такого типа обычно характеризуются относительно небольшими размерами, что ограничивает максимальный размер контролируемых катушек, и погрешностью от изменения среднего диаметра контролируемых катушек из-за неравномерности магнитного поля в пределах рабочего участка.

На рис. 1 представлен трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек [3], в основе которого находится ферромагнитный прямолинейный сердечник С, обмотка возбуждения ОВ, компенсационные катушки КК1 и КК2, расположенные по обе стороны от испытуемой ИК и эталонной ЭК катушек. Компенсационные катушки соединены последовательно и согласно между собой и обмоткой возбуждения, и подключены к источнику переменного напряжения  $\sim U$ .

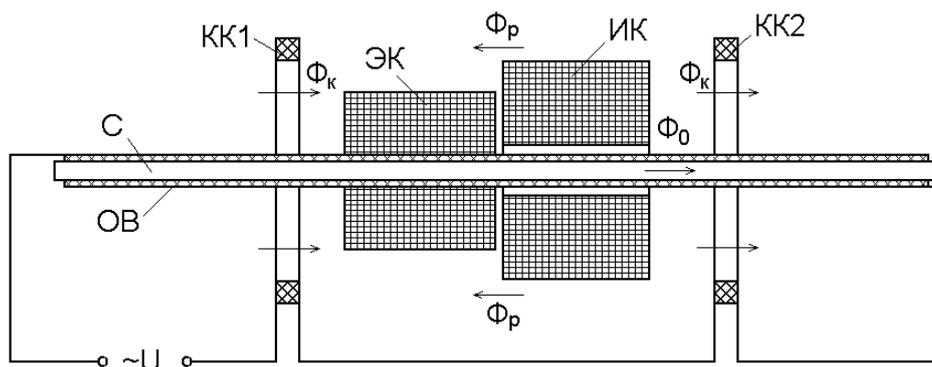


Рис. 1. Трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек

Магнитный поток состоит из основного потока возбуждения  $\Phi_0$ , проходящего по ферромагнитному сердечнику, т.е.  $\Phi_0 = f(I)$ , потока рассеяния  $\Phi_p$  и потока  $\Phi_k$ , создаваемого компенсационными катушками. Значение потока рассеяния  $\Phi_p$  зависит от взаимного расположения катушек.

Витки эталонной и контролируемой катушек охватывает магнитный поток

$$\Phi = \Phi_0 - \Phi_p + \Phi_k.$$

<sup>1</sup> ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

В результате сложения потока рассеяния и встречного ему компенсационного потока ЭДС, наводимая в витках эталонной и контролируемой катушек, слабо зависит от расположения контролируемой катушки относительно середины сердечника, что приводит к уменьшению погрешности измерения.

На рис. 2 представлен трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек [4], основанный на компенсационном способе измерения. Устройство содержит ферромагнитный сердечник С с расположенной на нем и равномерно распределенной основной обмоткой возбуждения ОВ, секционированной катушкой эталонных витков ЭК и контролируемой катушкой КК.

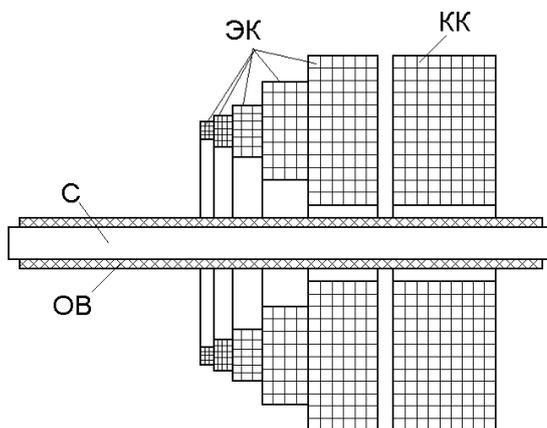


Рис. 2. Трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек

Для уменьшения основной погрешности секции катушки эталонных витков имеют одинаковый средний диаметр, равный среднему диаметру обмотки контролируемой катушки.

Погрешность устройства увеличивается как при увеличении числа витков эталонной и контролируемой катушек, так и при увеличении расстояния между ними.

На рис. 3 представлено устройство для измерения числа витков катушек [5]. Устройство содержит ферромагнитный сердечник 1, на котором находятся обмотка возбуждения 2, обмотка обратной связи 3 и контролируемая катушка 4. Устройство также содержит усилитель 5, управляемый делитель 6, диодный компаратор 7, источник переменного напряжения 8, источник опорного напряжения 9, измеритель числа витков 10.

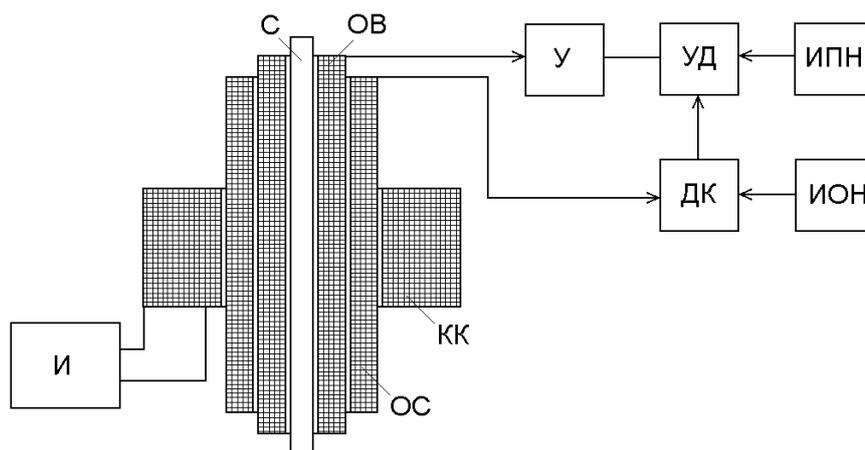


Рис. 3. Устройство для измерения числа витков катушек

При работе устройства переменное напряжение с источника переменного напряжения через управляемый делитель подается на усилитель, нагрузкой которого является обмотка возбуждения трансформаторного датчика. Напряжение с обмотки возбуждения поступает на диодный компаратор, сравнивается с опорным напряжением и подается на управляемый делитель. Такая система позволяет автоматически поддерживать постоянным магнитный поток, что

снижает погрешность от температурных изменений магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника, что повышает точность измерений при автоматизации процесса измерения.

Для повышения точности измерения числа витков катушек и расширения функциональных возможностей за счет измерения числа витков обмоток трансформаторов на тороидальных сердечниках было разработано устройство для измерения числа витков катушек индуктивности [6], схема которого представлена на рис. 4.

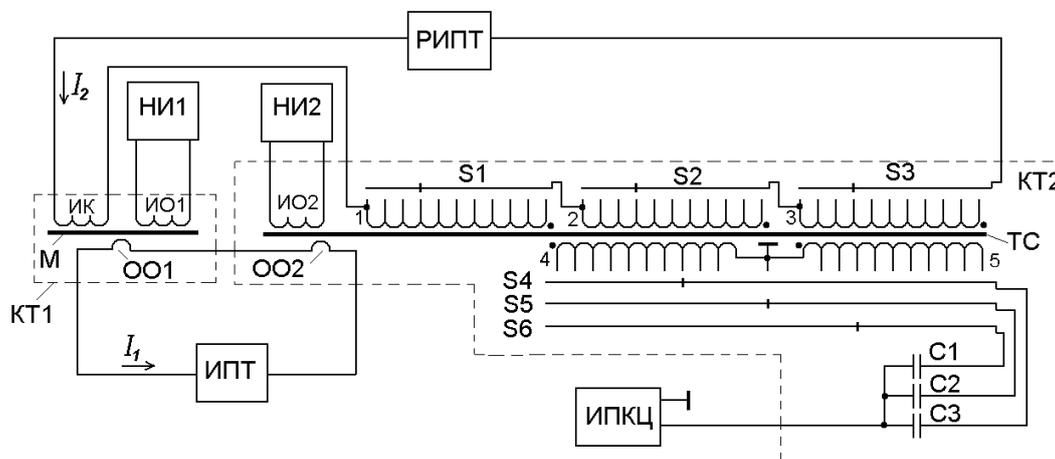


Рис. 4. Устройство для измерения числа витков катушек индуктивности

Устройство содержит первый компаратор КТ1 тока, который состоит из испытуемой катушки (обмотки) ИК, надетой на П-образный разъемный магнитопровод М при измерении числа витков испытуемой катушки (или намотанный на тороидальный сердечник М при измерении числа витков обмоток трансформаторов), через которые проходит проводник или намотана образцовая обмотка ОО1, индикаторной обмотки ИО1 и первого нулевого индикатора НИ1.

Второй компаратор тока КТ2 состоит из тороидального магнитного сердечника ТС и секционированных образцовых декадных обмоток 1–3 с тесной индуктивной связью, число включенных секций которых определяется переключателями S1–S3 соответственно.

На магнитопроводе второго компаратора тока также расположены квадратурные обмотки 4 и 5, которые через переключатели S4–S6 и конденсаторы C1, C2 и C3 соответственно подключены к источнику питания квадратурной цепи ИПКЦ, а также индикаторная обмотка ИО2, к которой подключен второй нулевой индикатор НИ2, реагирующий на первую гармонику тока, проходящего через образцовую обмотку ОО2. К источнику переменного тока ИПТ присоединены последовательно соединенные обмотки ОО1 и ОО2. К регулируемому источнику переменного тока с возможностью регулирования фазы РИПТ подключены испытуемая катушка ИК и образцовые обмотки 1–3.

Обмотки 1–3 выполнены в виде магазина обмоток, причем секции обмотки 1 содержат в десять раз больше витков, чем секции обмотки 2, секции которой, в свою очередь, содержат в десять раз больше витков, чем секции обмотки 3. В зависимости от конкретных требований к устройству число витков в магазине обмоток может быть отличным от показанного на рис. 4.

Емкости конденсаторов C1, C2 и C3 выбраны таким образом, что емкостной ток через конденсатор C1 в десять раз превышает ток через конденсатор C2, а ток через конденсатор C2 в десять раз превышает ток через конденсатор C3.

Испытуемая катушка ИК, обмотки ОО1, ОО2 и обмотки 1, 2, 3 соединены таким образом, что потоки в сердечниках компараторов токов КТ1 и КТ2 направлены встречно. Компаратор КТ1 состоит из разъемного сердечника М с высокой магнитной проницаемостью, на который надеты испытуемая катушка ИК и индикаторная обмотка ИО1.

При измерении числа витков обмоток трансформаторов с тороидальными сердечниками в качестве индикаторной обмотки ИО1 используется одна из обмоток трансформатора. Первичные обмотки ОО1 и ОО2 могут состоять из одного или нескольких витков. Частоты токов  $I_1$  и  $I_2$  выбираются исходя из размеров и материала сердечника М компаратора КТ1 и обусловленного этим чувствительности компаратора.

При работе устройства в первичной цепи компараторов КТ1 и КТ2, образованной витками обмоток ОО1 и ОО2, от источника ИПТ течет переменный ток  $I_1$ . Через испытуемую катушку ИК и образцовые обмотки 1–3 протекает переменный ток  $I_2$ , который регулируется по величине и фазе таким образом, что магнитный поток в магнитопроводе М компаратора КТ1 равен нулю, что определяется по нулевому индикатору НИ1.

Затем при помощи переключателей S1–S3 путем изменения числа включенных витков образцовых обмоток 1–3 добиваются компенсации синфазной составляющей магнитного потока в магнитопроводе ТС компаратора КТ2. Далее при помощи переключателей S4–S6 путем изменения числа включенных обмоток 4 и 5 добиваются компенсации квадратурной составляющей магнитного потока в магнитопроводе ТС компаратора КТ2. Равенство нулю магнитного потока в магнитопроводе ТС определяется по нулевому индикатору НИ2. Обмотки 4 и 5 соединены таким образом, что токи через них, сдвинутые при помощи конденсаторов С1–С3 на  $90^\circ$  относительно тока  $I_1$ , обеспечивают компенсацию квадратурной составляющей потока любой фазы.

Источник переменного тока ИПТ предназначен для питания квадратурной цепи компаратора тока КТ2. Фазовый сдвиг между токами  $I_1$  и  $I_2$  обусловлен потоками рассеяния в компараторе КТ1. Количество витков испытуемой катушки ИК определяется по показанию декад с образцовыми обмотками 1–3. Нулевые индикаторы НИ1 и НИ2 имеют в своем составе полосовые фильтры и реагируют только на первую гармонику токов  $I_1$  и  $I_2$ .

В процессе измерения числа витков при помощи компараторов тока определяется отношение токов из выражения

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_{U2}}{w_{U1}} = \frac{w_{02}}{w_{01}},$$

где  $w_{U2}$  – число витков первичной обмотки испытуемого трансформатора;  $w_{U1}$  – число витков испытуемой катушки компаратора;  $w_{01}$  – число витков первичной обмотки второго компаратора;  $w_{02}$  – число витков вторичной обмотки второго компаратора.

Высокая точность устройства обусловлена тем, что переменный ток  $I_1$ , проходящий через первичные обмотки компараторов КТ1 и КТ2, и ток  $I_2$ , проходящий через их вторичные обмотки, не измеряется. Погрешность данного устройства зависит от диапазона измерения и составляет  $\pm 2$  витка в диапазоне от 100 до 1000 витков и  $\pm 4$  витка в диапазоне от 1000 до 10000 витков (рис. 5).

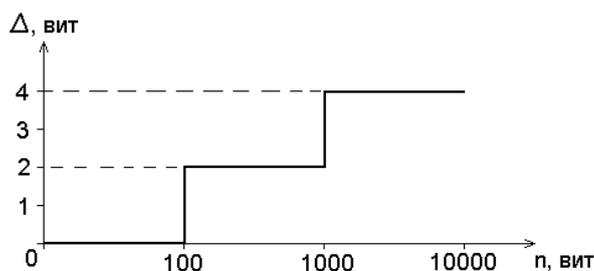


Рис. 5. График абсолютной погрешности устройства для измерения числа витков катушек индуктивности

Таким образом, рассмотренные устройства для контроля числа витков позволяют измерить число витков намотанной катушки после завершения технологической операции намотки до сборки трансформатора [7], что позволяет уменьшить количество брака при их производстве.

#### Список литературы

1. Мазель К. Б. Трансформаторы электропитания. М. : Энергоиздат, 1982. 80 с.
2. Герасимова Л. С., Дайнега И. А., Пшеничный Г. И., Чечелюк Я. З. Технология и механизация производства обмоток и изоляции силовых трансформаторов. М. : Энергия, 1979. 336 с.
3. А.с. СССР 440618, МПК G01R 29/20. Трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек / Солнцев В. А. № 1716793/24-7 ; заявл. 22.11.71 ; опубл. 25.08.74, Бюл. № 31.
4. А.с. СССР 473966, МПК G01R 29/20. Трансформаторный датчик для измерения числа витков катушек / Солнцев В. А. № 1680150/24-7 ; заявл. 06.07.71 ; опубл. 14.06.75, Бюл. № 22.

5. А.с. СССР 708263, МПК G01R 29/20. Устройство для измерения числа витков катушек / Казлаускене Э. В., Мартинайтис Г. И., Корбутович Р. З. № 2491541/18-21 ; заявл. 01.06.77 ; опубл. 05.01.80, Бюл. № 1.
6. А.с. СССР 1653435, МПК G01R 29/20. Устройство для измерения числа витков катушек индуктивности / Неведьев А. И. № 4480979/21 ; заявл. 06.06.89 ; опубл. 01.02.91.
7. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. М. : Энергоиздат, 2004. 616 с.

### References

1. Mazel' K.B. *Transformatory elektropitaniya = Transformers of power supply*. Moscow: Energoizdat, 1982:80. (In Russ.)
2. Gerasimova L.S., Daynega I.A., Pshenichnyy G.I., Chechelyuk Ya.Z. *Tekhnologiya i mekhanizatsiya proizvodstva obmotok i izolyatsii silovykh transformatorov = Technology and mechanization of production of windings and insulation of power transformers*. Moscow: Energiya, 1979:336. (In Russ.)
3. CC USSR 440618, IPC G01R 29/20. *Transformatornyy datchik dlya izmereniya chisla vitkov katushek = Transformer sensor for measuring the number of turns of coils*. Solntsev V.A. № 1716793/24-7; appl. 22.11.71; publ. 25.08.74, Bull. № 31. (In Russ.)
4. CC USSR 473966, IPC G01R 29/20. *Transformatornyy datchik dlya izmereniya chisla vitkov katushek = Transformer sensor for measuring the number of turns of coils*. Solntsev V.A. № 1680150/24-7; appl. 06.07.71; publ. 14.06.75, Bull. № 22. (In Russ.)
5. CC USSR 708263, IPC G01R 29/20. *Ustroystvo dlya izmereniya chisla vitkov katushek = Device for measuring the number of turns of coils*. Kazlauskene E.V., Martinaitis G.I., Korbutovich R.Z. № 2491541/18-21; appl. 01.06.77; publ. 05.01.80, Bull. № 1. (In Russ.)
6. CC USSR 1653435, IPC G01R 29/20. *Ustroystvo dlya izmereniya chisla vitkov katushek induktivnosti = Device for measuring the number of turns of inductors*. Nefed'ev A.I. № 4480979/21; appl. 06.06.89; publ. 01.02.91. (In Russ.)
7. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. (ed.). *Silovye transformatory. Spravochnaya kniga = Power transformers. Reference book*. Moscow: Energoizdat, 2004:616. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Алексей Иванович Неведьев

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры электротехники,  
Волгоградский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Волгоград, пр-т имени В. И. Ленина, 28)  
E-mail: nefediev@rambler.ru

#### Alexey I. Nefediev

Doctor of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department  
of electrical engineering,  
Volgograd State Technical University  
(28 V.I. Lenin avenue, Volgograd, Russia)

#### Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: iit@pnzgu.ru

#### Aleksey A. Trofimov

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

#### Иван Владимирович Самофалов

магистрант,  
Волгоградский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Волгоград, пр-т имени В. И. Ленина, 28)  
E-mail: sem3436@yandex.ru

#### Ivan V. Samofalov

Master degree student,  
Volgograd State Technical University  
(28 V.I. Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 05.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.03.2023

Принята к публикации / Accepted 10.04.2023

УДК 681.518.3

doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-7

## ВРЕМЯИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В АВТОНОМНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

А. В. Захаров<sup>1</sup>, И. В. Либкинд<sup>2</sup>, В. Ю. Трофимов<sup>3</sup>, Л. Е. Шахмейстер<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод, Калуга, Россия

<sup>3,4</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1,2</sup> Info@voshod-krlz.ru, <sup>3,4</sup> l.e.shahmejster@onegroup.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Обеспечение высокой точности работы автономных информационных и измерительных систем (АИИС) в жестких условиях их эксплуатации без использования прецизионных элементов при отсчете времен дистанционного действия, самоликвидации, замедления и другого, является актуальной задачей. *Материалы и методы.* Одним из путей ее решения является использование времяимпульсных преобразователей (ВИМП), осуществляющих преобразование временного интервала, подаваемого от аппаратуры дистанционного управления АИИС, во время его действия. *Результаты.* Рассмотрено построение времяимпульсных преобразователей различных дистанционных устройств АИИС, включая устройства с контролем установленного времени действия и коррекцией его после проведенной установки. Приведены выражения для определения погрешности отсчета времени действия. *Вывод.* Использование ВИМП в АИИС позволяет обеспечить отсчет времени действия изделий с погрешностью не более 0,1 % без применения в его составе прецизионных элементов. Для минимизации аппаратных затрат АИИС может использоваться ВИМП на МС 512ПС8ВК, на которой могут строиться дистанционно управляемые временные устройства с контролем введенной в них информации и ее коррекцией.

**Ключевые слова:** времяимпульсные преобразователи, микросхема 512ПС8ВК, дистанционное действие в автономных информационных и измерительных системах, контроль времени действия, коррекция времени действия

**Для цитирования:** Захаров А. В., Либкинд И. В., Трофимов В. Ю., Шахмейстер Л. Е. Времяимпульсные преобразователи в автономных информационных и измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 59–69. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-7

## TIME-PULSE CONVERTERS IN AUTONOMOUS INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

A.V. Zakharov<sup>1</sup>, I.V. Libkind<sup>2</sup>, V.Yu. Trofimov<sup>3</sup>, L.E. Shakhmeister<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> JSC "Voskhod" – Kaluga Radio Tube Plant, Kaluga, Russia

<sup>3,4</sup> Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

<sup>1,2</sup> Info@voshod-krlz.ru, <sup>3,4</sup> l.e.shahmejster@onegroup.ru

**Abstract.** *Background.* Ensuring high accuracy of autonomous information and measurement systems (AIMS) in harsh conditions of their operation without the use of precision elements when counting the times of remote action, self-destruction, delay, etc., is an urgent task. *Materials and methods.* One of the ways to solve it is the use of time-pulse converters (TPC) that transform the time interval supplied from remote control equipment to the AIMS during its operation. *Results.* The construction of time-pulse converters of various remote AIMS devices, including devices with control of the set time of action and its correction after installation, is considered. The expressions for determining the error of the time of action are given. *Conclusion.* The use of TPC in AIMS allows to provide a countdown of the time of action of products with an error of no more than 0.1 % without the use of precision elements in its composition. To minimize the hardware costs of AIMS, a TPC on MS 512PS8BK can be used, on which remotely controlled temporary devices can be built with the control of the information embedded in them and its correction.

**Keywords:** time-pulse converters, 512PS8BK chip, remote action in autonomous information and measurement systems, action time control, action time correction

**For citation:** Zakharov A.V., Libkind I.V., Trofimov V.Yu., Shakhmeister L.E. Time-pulse converters in autonomous information and measurement systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):59–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-7

Обеспечение высокой точности работы автономных информационных и измерительных систем (АИИС) в жестких условиях их эксплуатации без использования прецизионных элементов при отсчете времен дистанционного действия, самоликвидации, замедления и другого является актуальной задачей. Одним из путей ее решения является применение времяимпульсных преобразователей (ВИМП). Построение таких преобразователей приведено в томе 2 энциклопедии по кибернетике [1, с. 207]. В работах [2, 3] предложены ВИМП, являющиеся аналоговыми преобразователями напряжения во временные интервалы или частоту. Эти ВИМП содержат выполненные на операционных усилителях интегратор, компараторы напряжения и аналоговые коммутаторы. Погрешность преобразования определяется нестабильностью параметров элементов схемы, в частности, нестабильностью параметров  $RC$ -цепочки интегратора. В алгоритмах построения, рассматриваемых в указанных работах ВИМП, предусмотрено использование при преобразовании временного интервала лишь в качестве промежуточной величины преобразования, что вызывает необходимость иметь в составе ВИМП прецизионные элементы. При переходе на цифровые схемы обработки сигналов для получения высокоточного преобразования необходимо применение высокостабильных генераторов импульсов. Указанные генераторы обычно кварцевые, их стоимость более чем на порядок выше стоимости  $RC$ -генераторов. Обеспечение работоспособности кварцевых генераторов при стандартных для АИИС одиночных ударах с перегрузкой порядка 30000 вызывает определенные трудности. Необходимость использования прецизионных элементов ВИМП, рассматриваемых в работах [1–3], обусловлена использованием в них временного интервала лишь для промежуточного преобразования разнотипных физических величин. Принципиально в ВИМП может использоваться преобразование, в котором входным параметром является временной интервал или связанный с ним параметр (частота, период), который преобразуется с разделением по времени в выходной временной интервал (например, время дистанционного действия), связанный с входным заданной функциональной зависимостью, например линейной. Однотипность преобразуемых при этом физических величин создает хорошие предпосылки для получения высокой точности преобразования без использования прецизионных элементов. Построению таких ВИМП АИИС и посвящена данная работа.

В общем виде для реализации цифровых ВИМП могут использоваться цифровые микросхемы стандартной логики, программируемые логические интегральные схемы, базовые матричные кристаллы, микроконтроллеры, специализированные микросхемы (МС). Для изделий массового применения, каковыми являются АИИС, предпочтительнее применение специализированных МС, обладающих более высокой надежностью, устойчивостью к внешним электромагнитным полям, меньшим током потребления и более низкой стоимостью по сравнению с другими микросхемами. Для ВИМП АИИС такая специализированная МС разработана. Это МС ВИМП 512ПС8 ВК [4], выпуск которой освоен калужским радиоламповым заводом. Ее структурная схема приведена на рис. 1.

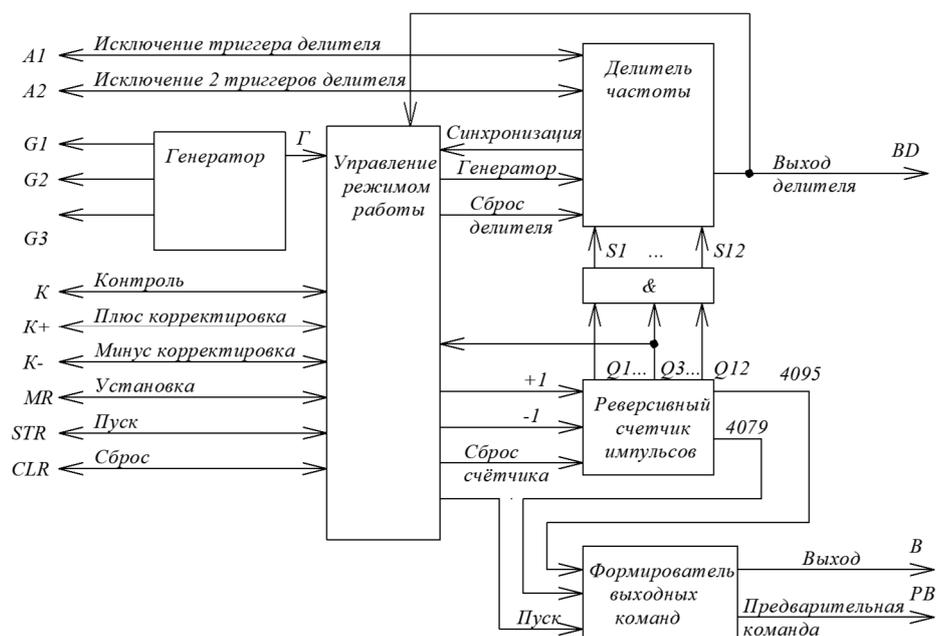


Рис. 1. Структурная схема ВИМП МС 512ПС8ВК

МС изготавливается по КМОП технологии. В ее состав входят 12-разрядный делитель частоты и реверсивный счетчик импульсов, генератор, блок управления режимом работы и формирователь выходных команд. Так же, как в ВИМП, реализованных на элементах аналоговой техники [2, 3], схема рис. 1 содержит интегратор (реверсивный счетчик импульсов), источник интегрируемой величины (генератор), компараторы (устройства, фиксирующие заполнение реверсивного счетчика импульсов и делителя частоты). Отличия заключаются в преобразуемых сигналах и замене аналоговых элементов (операционных усилителей) на цифровые (счетчики, логические элементы).

На рис. 2 приведена типовая схема ВИМП на МС 512ПС8ВК дистанционного изделия АИИС, получающего информацию о требуемом времени действия от аппаратуры дистанционного управления (АДУ).

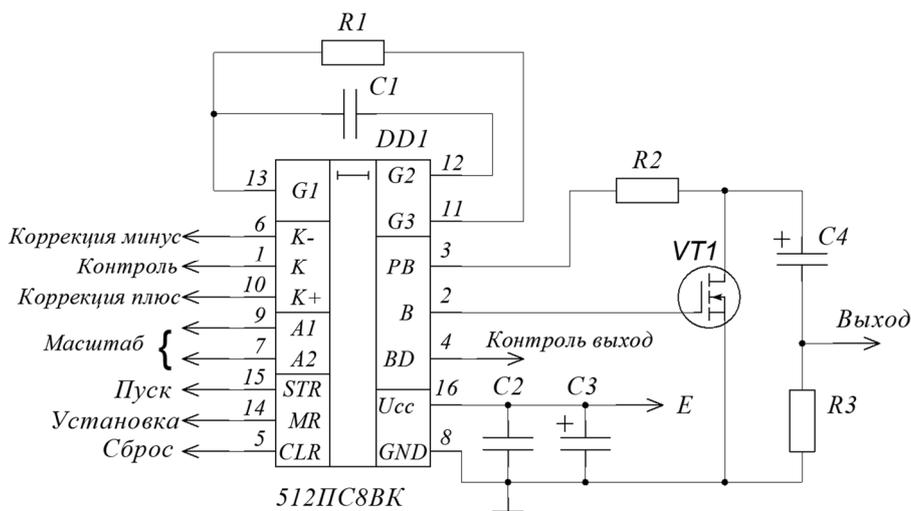


Рис. 2. Схема ВИМП дистанционного изделия АИИС

В состав схемы кроме непосредственно ВИМП с  $RC$ -цепочкой  $R1, C1$  задающего генератора включен исполнительный каскад, выполненный на МОП транзисторе  $VT1$ , конденсаторе  $C4$  и резисторах  $R2, R3$ . ВИМП построен на МС  $DD1$  512ПС8ВК, реализующей времяимпульсное преобразование:

$$T_d = Kt_y, \tag{1}$$

где  $T_d$  – время дистанционного действия, отсчитываемое от момента подачи сигнала «Пуск» на вывод  $STR$  МС  $DD1$ , до появления сигнала на выводе  $B$  МС и импульса на выводе «Выход» схемы;  $t_y$  – временной интервал установки между двумя импульсами, поступающими от АДУ на вход «Установка» и вывод  $MR$  МС  $DD1$ ;  $K$  – масштабирующий коэффициент.

В связи с тем, что в приведенном преобразовании участвует одна и та же физическая величина – временной интервал, высокая точность преобразования может достигаться без использования прецизионных элементов.

Значение масштабного коэффициента  $K$  в выражении (1) определяется сигналами, подаваемыми на выводы «Масштаб»  $A1, A2$  МС, изменяющими ее коэффициент деления делителя частоты (рис.1), как это указано в табл. 1.

Таблица 1

Значение масштабного коэффициента  $K$

$A2$	$A1$	$K$
0	0	4096
0	1	2048
1	0	1024
1	1	512

В соответствии с приведенным выражением (1) схема рис. 2 реализует масштабирующее времяимпульсное преобразование временного интервала  $t_y$ , поступающего от АДУ, во время действия  $T_d$ .

Циклограмма сигналов в процессе работы ВИМП приведена на рис. 3.

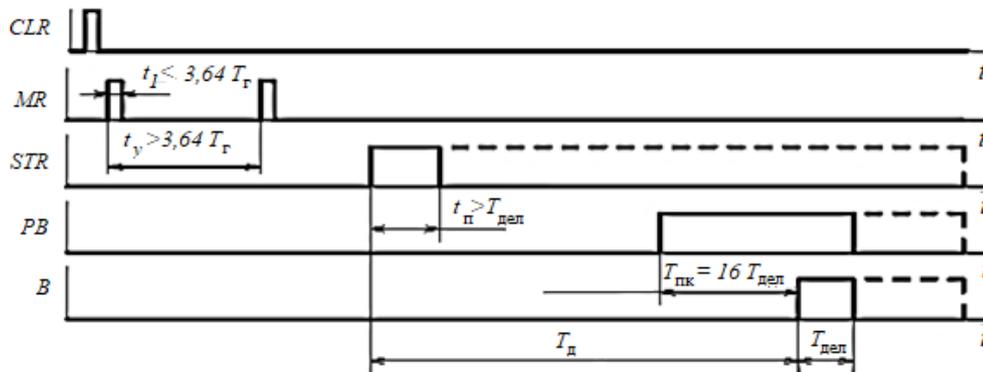


Рис. 3. Циклограмма сигналов ВИМП АИИС

Первоначально по входу «Сброс» на вывод  $CLR$  МС  $DD1$  подается импульс, устанавливающий все элементы схемы рис. 1 в исходное состояние, соответствующее записи в делитель частоты 0, а в реверсивный счетчик 4095 импульсов. Затем на вход «Установка» на вывод  $MR$  МС  $DD1$  подаются импульсы установки, временной интервал между которыми равен  $t_y$ . Отсчет установленного времени действия начинается при приходе на вывод «Пуск» команды, поступающей на вход  $STR$  МС. За время, равное  $T_{пк}$ , до выдачи команды окончания отсчета времени действия  $T_d$  на выходе  $PB$  МС формируется предварительная команда. Это время равно

$$T_{пк} = 16T_r,$$

где  $T_r$  – период импульсов генератора МС на шине  $\Gamma$  (см. рис. 1) и выводах  $G2, G3$  МС  $DD1$  (см. рис. 2).

По предварительной команде конденсатор  $C4$  заряжается через резистор  $R2$ . По окончании отсчета установленного времени через время действия  $T_d$  на выходе  $B$  МС  $DD1$  формируется сигнал, поступающий на затвор транзистора  $VT1$ . Транзистор открывается, на выводе «Выход» схемы формируется сигнал, обеспечивающий срабатывание спецэлемента АИИС.

Рассмотрим погрешность отсчета времени действия. В процессе установки в течение временного интервала  $t_y$  на вычитающий вход «-1» реверсивного счетчика МС 512ПС8ВК (см. рис. 1) поступает число импульсов  $N_{сч}$ , равное

$$N_{сч} = \frac{t_y}{T_{гy}}, \quad (2)$$

где  $T_{гy}$  – период генератора при установке временного интервала  $t_y$ .

При этом осуществляется преобразование временного интервала  $t_y$  в число импульсов  $N_{сч}$ , записываемое в реверсивный счетчик импульсов (рис. 1). Состояние  $Q$  счетчика при этом соответствует  $Q = 4095 - N_{сч}$ .

При отсчете времени действия записанное в реверсивный счетчик число импульсов  $N_{сч}$  списывается по входу «+1» импульсами с выхода делителя частоты, период следования которых равен  $KT_{гo}$ . Здесь значение периода генератора при отсчете времени действия взято равным  $T_{гo}$ . Формирование выходного сигнала происходит при полном списании записанного при установке в реверсивный счетчик числа импульсов  $N_{сч}$ . С учетом этого время действия  $T_d$  равно

$$T_d = N_{сч} K T_{го}. \quad (3)$$

В этом случае осуществляется преобразование числа импульсов  $N_{сч}$  во время действия  $T_d$ . Подставляя значение  $N_{сч}$ , записанное в счетчик при установке, имеем

$$T_d = K t_y \frac{T_{го}}{T_{гy}}.$$

Если пренебречь кратковременной нестабильностью частоты генератора и полагать, что в процессе установки и отсчета времени действия период генератора не изменяется, т.е.  $T_{го} = T_{гy} = T_g$ , то получаем времяимпульсное преобразование (1). Отметим, что при сделанном допущении в это преобразование период генератора не входит, в связи с чем его отклонения от номинального значения соответствующей погрешности преобразования не вызывают. В АИИС обычно время между вводом времени действия и его отсчетом не превышает 200 с, а в автоматизированных системах не превышает нескольких долей секунды.

При стабилизации питающего напряжения и нечувствительности элементов  $RC$ -генератора к механическим нагрузкам, характерным для АИИС, изменения частоты генератора в процессе установки и отсчета времени действия практически не происходит. Долговременная нестабильность частоты генератора, обусловленная в основном старением его элементов, погрешности отсчета времени действия не вызывает.

Выражение (2) представляет собой преобразование временного интервала  $t_y$  в код (число импульсов  $N_{сч}$ ). Это преобразование является дискретным, в связи с чем возникает погрешность, обусловленная дискретизацией преобразования. Выражения для определения погрешности дискретизации для различных вариантов преобразования временного интервала в код приведены в работе [5]. Иллюстрация появления погрешности дискретизации преобразования, осуществляемого МС 512ПС8ВК, показана на рис. 4, на котором приведена циклограмма сигналов при установке времени действия.

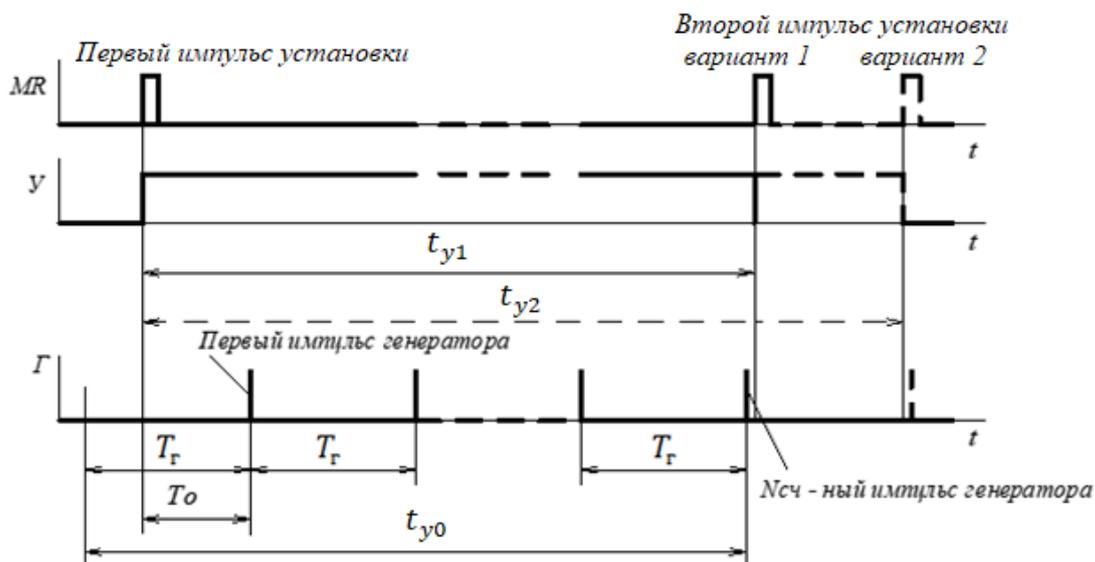


Рис. 4. Циклограмма сигналов при установке времени действия

На этом рисунке показаны два импульса установки на входе  $MR$  МС 512ПС8ВК, преобразованные эти импульсы в один импульс  $y$  и импульсы  $\Gamma$  на выходе генератора МС (см. рис. 1). Поступление первого импульса генератора осуществляется с задержкой, равной  $T_0$ , определяемой фазой формирования первого импульса генератора после его запуска:

$$\text{МС 512ПС8ВК } T_0 \approx 0,64T_g.$$

Фаза прихода второго импульса установки может быть различной. На рис. 4 показано два предельных варианта фазы прихода второго импульса установки относительно последнего воспринимаемого счетчиком импульса генератора. В первом варианте, соответствующем временному интервалу  $t_{y1}$ , второй импульс установки приходит сразу после импульса генератора, а во втором варианте, соответствующем временному интервалу  $t_{y2}$ , второй импульс приходит непосредственно перед приходом очередного импульса генератора, уже не воспринимаемого счетчиком МС. В любом из этих вариантов вместо временного интервала  $t_{y1}$ ,  $t_{y2}$  преобразование будет осуществлено дискретизированного временного интервала установки  $t_{y0}$ . При этом возникает аддитивная погрешность  $\Delta t_y$  дискретности преобразования, равная разности временного интервала  $t_{y0}$  и временного интервала  $t_y$ , лежащего в диапазоне  $(t_{y1}, t_{y2})$ . Поскольку в рассматриваемом случае фаза прихода второго импульса установки относительно последнего воспринимаемого счетчиком МС импульса генератора лежит в пределах  $(0, T_r)$ , можно записать

$$t_{y0} = t_y + (T_r - T_0) - (0, T_r) = t_y + T_r - T_0 - (0, 1)T_r,$$

$$\Delta t_y = t_{y0} - t_y = -T_0 + (0, 1)T_r,$$

$$\Delta t_y = (-T_0, (T_r - T_0)).$$

Эта погрешность является величиной случайной. Математическое ожидание  $M[\Delta t_y]$  аддитивной погрешности дискретности и ее предельные значения  $\Delta t_y$  равны

$$M[\Delta t_y] = \left( \frac{T_r}{2} - T_0 \right) = \left( \frac{T_r}{2} - 0,64T_r \right),$$

$$M[\Delta t_y] = -0,14 T_r, \Delta t_y = (-0,14 \pm 0,50) T_r. \quad (4)$$

В соответствии с выражением (1) могут быть записаны аналогичные выражения для математического ожидания  $M[\Delta T_d]$  и предельных значений составляющей аддитивной погрешности  $\Delta T_d$  отсчета времени действия  $T_d$ :

$$M[\Delta T_d] = -0,14 K T_r, \Delta T_d = (-0,14 \pm 0,50) K T_r. \quad (5)$$

Так, например, при  $T_r = 10$  мкс,  $K = 1024$ , диапазон времени действия  $T_d = [30 \cdot 10^{-3}, 40] c$ , аддитивная составляющая погрешности отсчета времени действия, обусловленная дискретностью преобразований, лежит в пределах  $\Delta T_d = (-1,4 \pm 5,0)$  мс.

Экспериментальные исследования ВИМП АИИС показали, что мультипликативная составляющая погрешности  $\delta T_d$  не превосходит 0,1 %. Она определяется кратковременным дрейфом частоты генератора МС, изменениями ее в процессе установки и отсчета времени действия при действии механических нагрузок, изменением напряжения питания и температуры элементов генератора. Погрешность отсчета АИИС времени действия на малых временах соответствует в основном аддитивной составляющей, а на больших временах – мультипликативной.

Записанные в выражениях (4), (5) аддитивные составляющие погрешности являются величинами случайными, распределенными по закону равномерной плотности.

В МС 512ПС8ВК предусмотрена возможность контроля установленного временного интервала  $t_y$ . Для этого необходимо на вывод МС  $K$  (вход «Контроль») (см. рис. 2) подать сигнал логической «1». Указанный сигнал может быть подан как до подачи временного интервала  $t_y$ , так и непосредственно перед контролем. Циклограмма сигналов в режиме контроля приведена на рис. 5.

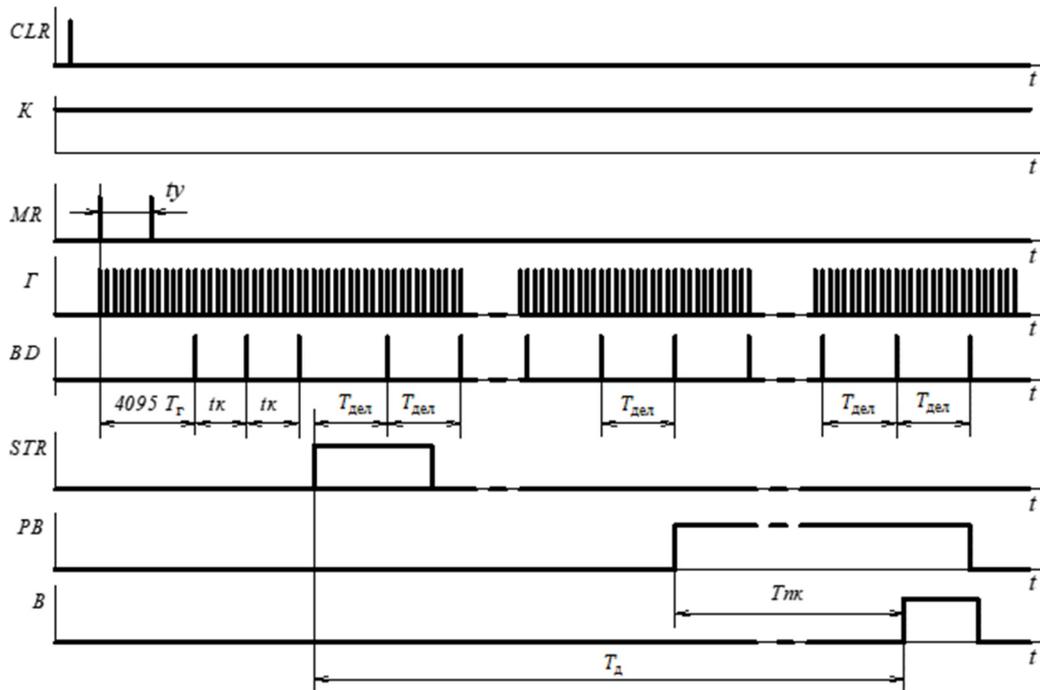


Рис. 5. Циклограмма сигналов в режиме контроля

При отсутствии контроля по окончании установки работа генератора прекращается и возобновляется при поступлении пускового сигнала на вывод МС STR (вход «Пуск»).

При контроле по окончании установки работа генератора не прекращается и импульсы генератора поступают на делитель частоты (см. рис. 1). Работа делителя частоты МС при контроле показана на рис. 6.



Рис. 6. Работа делителя частоты в режиме контроля:

- а – запись в делитель частоты при его заполнении содержимого реверсивного счетчика;
- б – изменение состояния делителя при контроле

Независимо от соединения выводов МС DD1 A1, A2 (входы «Масштаб») (см. рис. 2), коэффициент деления ее делителя частоты при контроле равен 4096. При заполнении делителя частоты сигналы с поразрядных выходов  $Q_1 \dots Q_{12}$  реверсивного счетчика через логические элементы «И» поступают на поразрядные входы  $S_1 \dots S_{12}$  делителя частоты (рис. 6,а). Таким образом, при каждом заполнении делителя в него записывается код (число)  $S$ , равный коду (числу)  $Q$ , записанному в реверсивный счетчик (рис. 6,б). Причем  $(4095 - S) = N_{сч}$ .

Период  $t_k$  импульсов контроля равен

$$t_k = (4095 - S)T_r = t_{y0}.$$

Отметим, что значение периода  $t_k$  соответствует не вводимому временному интервалу  $t_y$ , а принятому дискретизированному значению  $t_{y0}$ , отличающемуся от  $t_y$  на величину  $\Delta t_y$ , определяемую выражением (4).

Период получаемых с вывода МС *BD* (выхода «Контроль выход») схемы рис. 2 соответствует ожидаемому времени действия в предположении отсутствия изменения частоты генератора после установки в процессе контроля и отсчета времени действия.

ВИМП (см. рис. 2) допускает коррекцию установленного времени действия. Коррекция может осуществляться как при наличии контроля ( $K = 1$ ), так при его отсутствии ( $K = 0$ ). При  $K = 1$  коррекция может осуществляться после установки до и после пуска, а при  $K = 0$  только после пуска, после подачи пускового сигнала на вход МС *STR* («Пуск») в процессе отсчета времени действия. Коррекция осуществляется подачей импульсов на выходы МС  $K^-$  (вход «Коррекция минус») и  $K^+$  (вход «Коррекция плюс»). Первоначально после сброса реверсивный счетчик импульсов МС 512ПС8ВК (см. рис. 1) находится в полностью заполненном состоянии (логические «1» на выходах всех его разрядов,  $Q = 4095$ ). При установке содержимое счетчика уменьшается, а при отсчете увеличивается. Формирование выходного сигнала на выходе *B* («Выход») МС осуществляется при достижении исходного состояния счетчика,  $Q = 4095$ . Импульсы коррекции, подаваемые на выходы МС  $K^+$ ,  $K^-$ , поступают непосредственно на реверсивный счетчик, минуя делитель частоты. Подача импульсов коррекции на вход МС  $K^+$  увеличивает содержимое счетчика, что приводит к уменьшению времени действия, а на вход  $K^-$  МС уменьшает содержимое счетчика и увеличивает время действия. Каждый подаваемый импульс коррекции изменяет время действия на величину, равную периоду импульсов  $T_{дел}$ . Исходя из этого, время действия при коррекции определяется выражением

$$T_d = Kt_y + (N_{K^-} - N_{K^+})T_{дел} = Kt_y + (N_{K^-} - N_{K^+})KT_r, \quad (6)$$

где  $N_{K^-}$ ,  $N_{K^+}$  – количество импульсов коррекции, поступающих на выходы МС  $K^-$ ,  $K^+$  соответственно.

Для исключения одновременного поступления на реверсивный счетчик импульсов МС 512ПС8ВК с импульсами коррекции импульсов с ее делителя частоты в схеме рис. 1 предусмотрена синхронизация импульсов, поступающих на реверсивный счетчик. Наличие синхронизации накладывает ограничения на период  $T_{кор}$  импульсов коррекции, длительность которого должна быть не менее восьми периодов  $T_r$  генератора МС,

$$T_{кор} \geq 8T_r.$$

Импульсы коррекции, не удовлетворяющие указанному требованию, игнорируются.

В преобразователях, реализующих выражение (1), время действия  $T_d$  не зависит от частоты генератора МС, поскольку осуществляется преобразование одностипных физических величин: временной интервал  $t_y$ , поступающий при установке – время действие  $T_d$ .

При использовании коррекции, осуществляемой количеством импульсов, реализуется выражение (6), в котором присутствуют аргументы  $N_{K^-}$ ,  $N_{K^+}$ , не являющиеся временными интервалами. Кроме того, в преобразовании (6) имеется аргумент  $T_{дел}$ , напрямую зависящий от периода генератора МС  $T_r$ . В этой связи преобразование (6) осуществляется с погрешностью  $\Delta T_d$ , равной

$$\Delta T_d = (N_{K^-} - N_{K^+})K\Delta T_r,$$

где  $\Delta T_d$ ,  $\Delta T_r$  – абсолютные значения погрешности отсчета времени действия  $T_d$  и периода генератора  $T_r$  соответственно.

При коррекции не числом импульсов, а временным интервалом можно обеспечить отсутствие зависимости времени действия  $T_d$  от периода задающего генератора  $T_r$ . Реализация такой

коррекции может осуществляться подключением выхода  $G1$  или  $G2$  генератора МС  $DD1$  (см. рис. 2) к входу «Коррекция минус» или «Коррекция плюс» на время, равное временному интервалу коррекции  $t_{кор}$ .

Учитывая, что МС  $DD1$  пропускает на входы коррекции только импульсы, период следования которых не менее восьми периодов импульсов генератора, время действия равно

$$T_d = K \left( t_y \pm \frac{1}{8} t_{кор} \right).$$

Знак «+» в записанном выражении соответствует подаче импульсов на вывод «Коррекция минус», а знак «-» на вывод «Коррекция плюс» схемы рис. 2.

Записанное выражение не содержит значение  $T_r$ , следовательно, отклонение периода генератора от номинального значения при пренебрежении его кратковременной нестабильностью погрешности отсчета времени действия не вызывает.

В соответствии с табл. 1 минимальное значение масштабного коэффициента  $K$  равно 512. В ряде случаев для обеспечения отсчета малых времен необходима значительно меньшая величина масштабного коэффициента. Примером таких времен могут служить времена дальнего взведения, замедления при встрече с преградой и др. МС 512ПС8ВК позволяет решить эту задачу и иметь масштабный коэффициент  $K$ , равный приблизительно 9 или 8. Для реализации этого необходимо вывод «Коррекция минус» ВИМП (см. рис. 2) соединить с выводом генератора  $G2$  или  $G3$  МС  $DD1$ .

При установке на вычитающий вход реверсивного счетчика импульсов МС поступает число импульсов  $N_{сч}$ , равное

$$N_{сч} = 1 \frac{1}{8} \frac{t_y}{T_r}.$$

Если при отсчете времени действия вывод «Коррекция минус» ВИМП (см. рис. 2) остается соединенным с выводом генератора  $G2$  или  $G3$  МС  $DD1$ , то время действия схемы равно

$$T_d = N_{сч} \frac{T_r}{\frac{1}{8} + \frac{1}{K}} = t_y \frac{9K}{K+8}.$$

Обозначив получившийся масштабный коэффициент  $K1 = \frac{9K}{K+8}$ , имеем

$$T_d = K1 t_y.$$

При  $K = 512, 1024, 2048, 4096$  соответственно  $K1 = 8,86; 8,93; 8,97; 8,98$ .

Если соединение вывода «Коррекция минус» ВИМП с выводом генератора  $G2$  или  $G3$  МС  $DD1$  осуществляется только при отсчете времени действия, то  $N_{сч} = \frac{t_y}{T_r}$ ,  $T_d = N_{сч} \frac{T_r}{\frac{1}{8} + \frac{1}{K}} = t_y \frac{8K}{K+8}$ ,  $K2 = \frac{8K}{K+8}$  и при  $K = 512, 1024, 2048, 4096$  соответственно  $K2 = 7,88; 7,94; 7,97; 7,98$ .

В обоих случаях значение коэффициента кратности значительно меньше 512, что позволяет отсчитывать малые времена.

### Заключение

В заключение отметим:

- использование ВИМП в АИИС позволяет создавать высокоточные дистанционные изделия (с погрешностью не более 0,1 %) без использования в их составе прецизионных элементов;
- обеспечение высокой точности дистанционного действия определяется использованием ВИМП, осуществляющих преобразование однотипных физических величин: временной интервал, формируемый АДУ при установке времени действия – время действия;

– использование МС 512ПС8ВК позволяет минимизировать затраты изготовления ВИМП дистанционно управляемых временных устройств АИИС с контролем введенной в них информации и ее коррекцией.

### Список литературы

1. Глушков В. М., Амосов Н. М. Энциклопедия кибернетики : в 2 т. Киев : Главная редакция УКЭ, 1974. Т. 2. 619 с.
2. Пат. 2257682 Российская Федерация. Вреямпульсный универсальный интегрирующий преобразователь напряжения / Кук И. А. № 2018128886 ; заявл. 06.08.2018 ; опубл. 29.05.2019.
3. Пат. 2731601 Российская Федерация. Вреямпульсный универсальный интегрирующий преобразователь напряжения с функцией широтно-импульсной модуляции / Сафинов Ш. С. № 2020109531 ; заявл. 03.03.2020 ; опубл. 04.09.2020.
4. Микросхемы интегральные 512ПС8ВК. Технические условия ЛСАР.431239.001ТУ. ЕКПС 5962. АО «Восход» – КЛРЗ. 2021. 62 с.
5. Трофимов В. Ю., Шахмейстер Л. Е. Использование микроконтроллеров при преобразовании временного интервала в цифровой код // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 3. С. 13–22.

### References

1. Glushkov V.M., Amosov N.M. *Entsiklopediya kibernetiki: v 2 t. = Encyclopedia of Cybernetics : in 2 vols.* Kiev: Glavnaya redaktsiya UKE, 1974;2:619. (In Russ.)
2. Patent 2257682 Russian Federation. *Vremyaimpul'snyy universal'nyy integriruyushchiy preobrazovatel' napryazheniya = Time pulse universal integrating voltage converter.* Kuk I.A. № 2018128886; appl. 06.08.2018; publ. 29.05.2019. (In Russ.)
3. Patent 2731601 Russian Federation. *Vremyaimpul'snyy universal'nyy integriruyushchiy preobrazovatel' napryazheniya s funktsiey shirotno-impul'snoy modulyatsii = Time-pulse universal integrating voltage converter with pulse-width modulation function.* Safinov Sh.S. № 2020109531; appl. 03.03.2020; publ. 04.09.2020. (In Russ.)
4. *Mikroskhemy integral'nye 512PS8VK. Tekhnicheskie usloviya LSAR.431239.001TU. EKPS 5962. AO «Voskhod» – KLRZ = Integrated circuits 512PS8VC. Technical specifications LSAR.431239.001TU. ECPS 5962. JSC "Voskhod" – KLRZ.* 2021:62. (In Russ.)
5. Trofimov V.Yu., Shakhmeyster L.E. The use of microcontrollers when converting a time interval into a digital code. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2016;(3):13–22. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Антон Вячеславович Захаров

начальник отдела,  
АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод  
(Россия, г. Калуга, Грабцевское шоссе, 43)  
E-mail: Info@voshod-krlz.ru

#### Anton V. Zakharov

Head of the department,  
JSC "Voskhod" – Kaluga Radio Tube Plant  
(43 Grabtsevskoe highway, Kaluga, Russia)

#### Илья Владимирович Либкина

технический директор,  
АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод  
(Россия, г. Калуга, Грабцевское шоссе, 43)  
E-mail: Info@voshod-krlz.ru

#### Ilya V. Libkind

Technical director,  
JSC "Voskhod" – Kaluga Radio Tube Plant  
(43 Grabtsevskoe highway, Kaluga, Russia)

#### Вадим Юрьевич Трофимов

кандидат технических наук,  
доцент кафедры автономных информационных  
и вычислительных систем,  
Балтийский государственный технический  
университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
1-я Красноармейская ул., 1)  
E-mail: l.e.shahmejster@onegroup.ru

#### Vadim Yu. Trofimov

Candidate of technical sciences, associate professor  
of the sub-department of autonomous information  
and measurement systems,  
Baltic State Technical University "Voenmeh"  
named after D.F. Ustinov  
(1 1st Krasnoarmeyskaya street,  
Saint Petersburg, Russia)

**Леонид Ефимович Шахмейстер**

доктор технических наук,  
профессор кафедры автономных  
информационных и вычислительных систем,  
Балтийский государственный технический  
университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
1-я Красноармейская ул., 1)  
E-mail: l.e.shahmeister@onegroup.ru

**Leonid E. Shakhmeister**

Doctor of technical sciences,  
professor of the sub-department of autonomous  
information and measurement systems,  
Baltic State Technical University "Voenmeh"  
named after D.F. Ustinov  
(1 1st Krasnoarmeyskaya street,  
Saint Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 27.01.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 27.02.2023**

**Принята к публикации/Accepted 24.03.2023**

УДК 504.064.36  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-8

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА

О. Е. Безбородова<sup>1</sup>, О. Н. Бодин<sup>2</sup>, Н. С. Коваль<sup>3</sup>, А. А. Трофимов<sup>4</sup>, А. В. Григорьев<sup>5</sup>

<sup>1,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

<sup>3</sup> Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup> ot@pnzgu.ru, <sup>2</sup> bodin\_o@inbox.ru, <sup>3</sup> koval-nc@mail.ru, <sup>4</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>5</sup> a\_grigorev@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В основе обеспечения экологического благополучия человека в территориальной техносфере лежит проведение многопараметрического анализа состояния элементов территориальной техносферы. Качество проведения измерительного контроля факторов риска определяет результативность управляющих воздействий, направленных на обеспечение экологического благополучия человека. Целью данной работы является метрологический анализ измерительного канала многоканальной информационно-измерительной системы. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: представить структуру измерительного канала; установить, какие компоненты измерительного канала влияют на относительную погрешность измеряемой величины; рассчитать относительную погрешность контролируемого параметра, используя ее случайную и методическую погрешности. *Материалы и методы.* Приведены структурные схемы информационно-измерительной системы обеспечения экологического благополучия человека и ее измерительного канала, рассмотрена методика расчета суммарной относительной погрешности измерения, приведены зависимости для определения относительной погрешности для каждого компонента измерительного канала. *Результаты.* Проведены расчет и анализ суммарной относительной погрешности измерительного канала для аммиака в атмосфере, установлен «вклад» каждого компонента измерительного канала. *Выводы.* В результате проведенного метрологического анализа измерительного канала информационно-измерительной системы для определения экологического благополучия человека установлено, что суммарная относительная погрешность составляет не более 0,4 %, что является приемлемым значением для измерительного контроля.

**Ключевые слова:** измерительный канал, информационно-измерительная система, экологическое благополучие человека, погрешность измерения

**Для цитирования:** Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Коваль Н. С., Трофимов А. А., Григорьев А. В. Метрологический анализ измерительного канала информационно-измерительной системы для определения экологического благополучия человека // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 70–76. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-8

## METROLOGICAL ANALYSIS OF THE MEASURING CHANNEL OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR DETERMINING THE ENVIRONMENTAL WELL-BEING OF HUMANS

O.E. Bezborodova<sup>1</sup>, O.N. Bodin<sup>2</sup>, N.S. Koval<sup>3</sup>, A.A. Trofimov<sup>4</sup>, A.V. Grigoriev<sup>5</sup>

<sup>1,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> Penza State Technological University, Penza, Russia

<sup>3</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup> ot@pnzgu.ru, <sup>2</sup> bodin\_o@inbox.ru, <sup>3</sup> koval-nc@mail.ru, <sup>4</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>5</sup> a\_grigorev@mail.ru

**Abstract.** *Background* The basis for ensuring the ecological well-being of a person in the territorial technosphere is a multi-parameter analysis of the state of the elements of the territorial technosphere. The quality of the measurement control of risk factors determines the effectiveness of control actions aimed at ensuring the environmental well-being of a person. The purpose of this work is the metrological analysis of the measuring channel of a multichannel information-measuring system. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: to present the structure of the

measuring channel; establish which components of the measuring channel affect the relative error of the measured value; calculate the relative error of the controlled parameter using its random and methodological errors. *Materials and methods.* The article presents block diagrams of the information-measuring system for ensuring the ecological well-being of a person and its measuring channel, considers the method for calculating the total relative measurement error, and shows dependencies for determining the relative error for each component of the measuring channel. *Results.* The calculation and analysis of the total relative error of the measuring channel for ammonia in the atmosphere were carried out, and the «contribution» of each component of the measuring channel was established. *Conclusion.* As a result of the metrological analysis of the measuring channel of the information-measuring system for determining the environmental well-being of a person, it was found that the total relative error is no more than 0,4 %, which is an acceptable value for measuring control.

**Keywords:** measuring channel, information-measuring system, human ecological well-being, measurement error

**For citation:** Bezborodova O.E., Bodin O.N., Koval N.S., Trofimov A.A., Grigoriev A.V. Metrological analysis of the measuring channel of the information-measuring system for determining the environmental well-being of humans. *Izmenenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):70–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-8

### *Постановка проблемы*

В основе обеспечения экологического благополучия человека в территориальной техносфере лежит проведение многопараметрического анализа состояния элементов территориальной техносферы: функционального состояния организма человека, качества окружающей среды и объектов техносферы. Многопараметрический анализ основан на регулярном измерительном контроле значений факторов риска. Это специально разработанный комплекс инструментальных замеров и контроля функционального состояния здоровья человека, окружающей среды и объектов техносферы. Качество проведения многопараметрического измерительного контроля факторов риска определяет результативность управляющих воздействий, направленных на обеспечение экологического благополучия человека. Информация, полученная в рамках многопараметрического измерительного контроля должна удовлетворять принципам инвариантности, комплексности, наличия причинно-следственных связей, оперативности. Именно эти данные характеризуют сложившуюся под воздействием факторов риска ситуацию в территориальной техносфере и позволяют выявить причинно-следственные связи для составления прогноза ее изменения и осуществления корректирующих мероприятий.

В Российской Федерации специально уполномоченные органы (Росприроднадзор, Роспотребнадзор, Ростехнадзор) осуществляют измерительный контроль элементов территориальной техносферы. К основным недостаткам этого измерительного контроля относят: различие методик сбора и измерения данных; использование морально устаревших приборов в лабораториях и на постах наблюдения; большую долю ручного труда при измерении, передаче, обработке, накоплении результатов измерительного контроля; отсутствие алгоритмов и адекватных моделей комплексной обработки, оценки и прогнозирования разнородных данных: медицинских, экологических и технологических.

Во всем мире совершенствование приборной базы для повышения эффективности многопараметрического измерительного контроля основано на цифровизации и интеллектуализации при разработке и внедрении приборного и программного обеспечения; внедрении дистанционного измерительного контроля; разработке методов и моделей для оценки и прогноза изменения уровня экологического благополучия человека.

У созданных на этой основе информационно-измерительных систем (ИИС) возрастает количество измеряемых параметров и скорость измерительного контроля, что позволяет им проводить сбор, регистрацию и обработку данных в масштабе реального времени. При разработке таких ИИС особое внимание необходимо уделять взаимодействию компонентов друг с другом, особенно измерительным каналам, обеспечивающим точность, достоверность и оперативность получения данных для оценки уровня экологического благополучия человека.

Целью данной работы является метрологический анализ измерительного канала многоканальной ИИС параллельного действия (МК ИИС ПД) для определения экологического благополучия человека.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: представить структуру измерительного канала; установить составляющие компоненты измерительного канала, влияющие на относительную погрешность измеряемой величины; рассчитать относительную

погрешность контролируемого параметра с учетом ее случайной и методической погрешностей.

### Материалы и методы

В ГОСТ Р 8.596 под измерительной системой (ИС) понимается совокупность измерительных, связующих, вычислительных компонентов, образующих измерительные каналы, и вспомогательных устройств (компонентов ИС), функционирующих как единое целое, предназначенных для: получения информации о состоянии объекта с помощью измерительных преобразований в общем случае множества изменяющихся во времени и распределенных в пространстве величин, характеризующих это состояние; обработки результатов измерений; регистрации и индикации результатов измерений и результатов их обработки; преобразования этих данных в выходные сигналы системы в разных целях<sup>1</sup>.

Структурная схема МК ИИС ПД определения экологического благополучия человека, разработанная на основе требований ГОСТа, приведена на рис. 1.

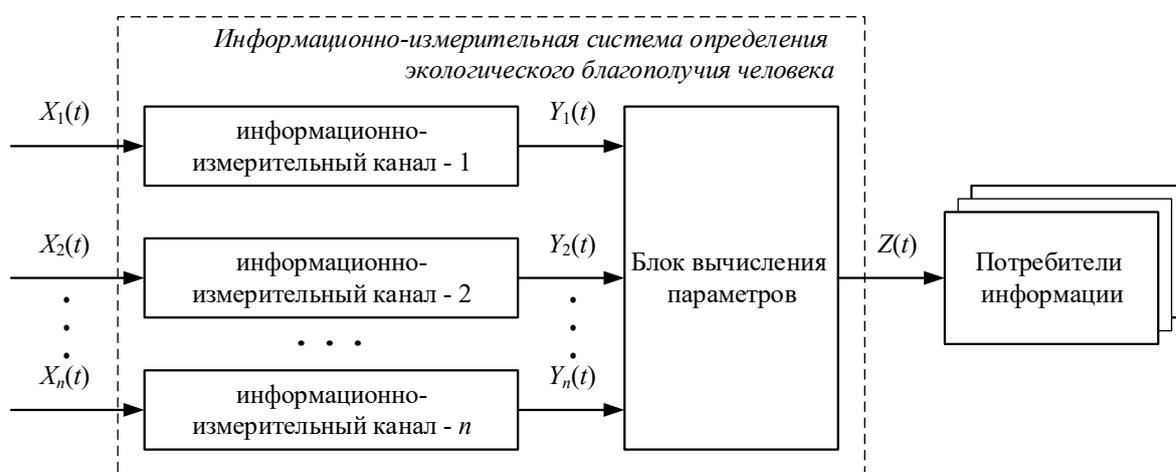


Рис. 1. Структурная схема МК ИИС ПД

Такие МК ИИС ПД обладают более высокими надежностью и быстродействием при параллельном получении данных в режиме реального времени, выбором средств измерений в зависимости от набора измеряемых величин, что исключает требование унификации сигналов – основное в одноканальных ИИС [1, 2]. Также неоспоримое достоинство МК ИИС ПД – параллельное измерение в режиме реального времени совокупности параметров различных по природе происхождения объектов (человека, окружающая среда, технологический процесс).

Основой МК ИИС ПД является измерительный канал. Под измерительным каналом (ИК) ИС [1] понимается конструктивно или функционально выделяемая часть ИС, выполняющая законченную функцию от восприятия измеряемой величины до получения результата ее измерений, выраженного числом или соответствующим ему кодом, или до получения аналогового сигнала, один из параметров которого – функция измеряемой величины. Структура типового измерительного канала МК ИИС ПД определения экологического благополучия человека приведена на рис. 2.

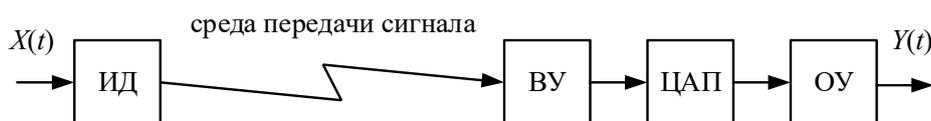


Рис. 2. Структурная схема измерительного канала:

$X(t)$  – функция измеряемого параметра;  $Y(t)$  – функция выходного сигнала

<sup>1</sup> ГОСТ Р 8.596-2002. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.

Измерительный канал состоит из интеллектуального датчика (ИД), среды передачи сигнала, вычислительного устройства (ВУ), цифроаналогового преобразователя (ЦАП), операционного усилителя (ОУ).

В качестве первичного преобразователя измеряемой величины выбран ИД [3], т.е. адаптируемый датчик с функцией метрологического самоконтроля. ИД имеет цифровой выход и может обеспечивать передачу информации о метрологической исправности через интерфейс. При этом, обладая вычислительными возможностями, ИД позволяет осуществлять автоматическую коррекцию погрешности, появившейся в результате воздействия влияющих величин и/или старения компонентов; самовосстановление при возникновении единичного дефекта в датчике; самообучение<sup>1</sup>. Функции обработки, регистрации и индикации результатов измерений выполняет ВУ. ЦАП необходим для преобразования измерительной информации из цифровой формы в аналоговый сигнал для связи с аналоговыми элементами ИИС. ОУ выполняет функции усиления, фильтрации и смещения нуля, приведенное ко входу.

В соответствии с работами [3, 4], если погрешности вызываются несколькими (три и более) независимыми друг от друга случайными причинами, то складываются не сами погрешности, а их квадраты. Поэтому суммарная относительная погрешность измерения контролируемого параметра связана со случайной и методической погрешностями выражением

$$\delta_{\Pi} = k \sqrt{\delta_{\text{ВУ}}^2 + \delta_{\text{ЦАП}}^2 + \delta_{\text{Кс}}^2 + \delta_{\text{ОУ}}^2}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый доверительной вероятностью  $P$ . Для  $P = 0,95$  коэффициент  $k = 1,1$ ;  $\delta_{\text{ВУ}}^2$  – относительная погрешность представления числа в вычислительном устройстве с плавающей запятой;  $\delta_{\text{ЦАП}}^2$  – суммарная относительная погрешность ЦАП;  $\delta_{\text{Кс}}^2$  – относительная погрешность вносимая каналом связи;  $\delta_{\text{ОУ}}^2$  – относительная погрешность операционного усилителя, определяемая по формуле

$$\delta_{\text{ОУ}}^2 = \delta_{\text{ус}}^2 + \delta_{\text{ФНЧ}}^2 + \delta_{\text{см}}^2, \quad (2)$$

где  $\delta_{\text{ус}}^2$  – относительная погрешность операции усиления;  $\delta_{\text{ФНЧ}}^2$  – относительная погрешность фильтра низкой частоты;  $\delta_{\text{см}}^2$  – относительная погрешность смещения.

В расчетах предполагаем, что для всех погрешностей приблизительно одинаковы доверительные вероятности. Анализ выражения (1) показывает: если погрешность одного из компонентов измерительного канала значительно меньше остальных, то ее вкладом в суммарную погрешность можно пренебречь. В ряде случаев при множественных измерениях получают одинаковые значения контролируемого параметра. Из этого следует, что погрешность не более чем минимальное значение, измеряемое прибором. И, следовательно, суммарная погрешность формируется допустимой методической погрешностью.

Уравнения (1) и (2) описывают суммарную погрешность как сумму погрешностей, формируемых выполняемыми измерительными преобразованиями [5].

Производители ЦАП обычно указывают характеристики, позволяющие оценить его суммарную погрешность. Но значительный вклад вносит инструментальная погрешность, связанная с нестабильностью источника опорного напряжения, выходных операционных усилителей и пр. К причинам появления погрешностей компонентов ИК можно отнести технологический разброс значений контролируемых параметров, влияние параметров внешней среды, старение средств измерений, возникновение шумов и помех (внешних и внутренних). Исходя из этого функции преобразования используемых ЦАП не совпадают с идеальными по целой совокупности параметров (форма, количество и уровень ступеней, расположение относительно координатных осей).

Суммарная относительная погрешность ЦАП зависит от аддитивной погрешности ( $ADD$ ), интегральной нелинейности ( $INL$ ), дифференциальной нелинейности ( $DNL$ ), ошибки опорного напряжения ( $OP$ ), ошибки квантования ( $KB$ ) и определяется по формуле

<sup>1</sup> ГОСТ Р 8.673-2009. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

$$\delta_{\text{ЦАП}} = \sqrt{\delta_{\text{ADD}}^2 + \delta_{\text{INL}}^2 + \delta_{\text{DNL}}^2 + \delta_{\text{ОП}}^2 + \delta_{\text{КВ}}^2}, \quad (3)$$

где  $\delta_{\text{ADD}} = 0,011\%$  от общего диапазона входных значений ЦАП;  $\delta_{\text{INL}} = \pm 0,08\%$  от общего диапазона входных значений ЦАП;  $\delta_{\text{DNL}} = \pm 0,04\%$  от общего диапазона входных значений ЦАП;  $\delta_{\text{ОП}} = \pm 0,019\%$  от общего диапазона входных значений ЦАП;  $\delta_{\text{КВ}} \approx 0,011\%$  от общего диапазона входных значений ЦАП.

Операционный усилитель *TL074* (*Texas Instruments*) выполняет функции усиления, фильтрации и смещения сигнала. Им вносятся следующие погрешности: ошибка усиления равна  $\delta_y = 0,01\%$  от общего диапазона входных значений,  $\delta_T = 0,5 \text{ ppm} / ^\circ\text{C} = 0,00005\% / ^\circ\text{C}$ ; температурным смещением можно пренебречь, так как система работает в нормальных условиях:

$$\delta_{\text{yc}} = \sqrt{\delta_y^2 + \delta_T^2}. \quad (4)$$

Погрешность фильтра низкой частоты этого операционного усилителя определим по формуле

$$\delta_{\text{ФНЧ}} = \sqrt{\delta_{U_c}^2}, \quad (5)$$

где  $\delta_{U_c}$  – погрешность, вызванная напряжением смещения, которую определим по формуле

$$\delta_{U_c} = \frac{U_c}{U_{\text{Вх.макс}}} 100\%. \quad (6)$$

Погрешность смещения сигнала, зависящую только от погрешности, вызванной напряжением смещения, определим по формуле

$$\delta_{\text{см}} = \sqrt{\delta_{U_c}^2}. \quad (7)$$

Если для передачи сигнала с датчика на ИИС использовать кабель с гнездом типа CP50, то в соответствии с руководством [6] и учитывая, что 1 дБ означает уменьшение амплитуды сигнала в  $10^{0,05} \approx 1,122$  раза на 100 м (на 1 м затухание 0,001 дБ/м), относительная погрешность, вносимая каналом связи в результате затухания полезного сигнала, составит  $\delta_{\text{кв}}^2 = 0,0005\%$  на каждый метр кабеля.

В качестве первичного преобразователя сигнала предлагается использовать датчик концентрации аммиака, характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики динамического преобразователя аналоговой измерительной информации датчика аммиака EnergoM-3001-NH3 [7]

Наименование	Значение
Регистрируемый газ	Аммиак ( $\text{NH}_3$ )
Метод измерения	Полупроводниковый сенсор
Диапазон измерений, ppm	0...500
Скорость передачи данных	2400, 4800, 9600
Порт связи	RS485 Modbus-RTU/ реле/ аналоговый выход
Точность измерения температуры	$\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$ ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )
Точность измерения влажности	0 % RH-100 % RH
Точность измерения концентрации	0,1ppm

### Результаты и обсуждение

Авторами проведен метрологический анализ измерительного канала ИИС для определения экологического благополучия человека на примере определения относительной погрешности с первичного преобразователя – датчик концентрации аммиака, характеристики которого приведены в табл. 1.

Измерительный контроль, выполняемый ВУ, осуществляем в соответствии с руководством [7]. Исходя из этого относительная погрешность представления числа в ВУ с плавающей запятой типа *float* составит  $\delta_{\text{ВУ}} \approx 1 \cdot 10^{-8} \%$ .

Погрешность представления числа в ВУ с плавающей запятой в несколько раз меньше остальных погрешностей, поэтому ее влияние на суммарную погрешность не велико и ею можно пренебречь.

При расчете суммарной относительной погрешности ЦАП по формуле (3) получаем

$$\delta_{\text{ЦАП}} = \sqrt{(0,011)^2 + (0,08)^2 + (0,04)^2 + (0,019)^2 + (0,011)^2} = 0,31 \%$$

Погрешность операционного усилителя, рассчитанная по формуле (4), составит

$$\delta_{\text{ус}} = \pm 0,01 \%$$

Погрешность ФНЧ, учитывающая напряжение смещения, определим по формуле (5):

$$\delta_{\text{ФНЧ}} = \pm 0,1 \%$$

Погрешность, вызванная напряжением смещения:

$$\delta_{\text{см}} = 0,1 \%$$

Тогда суммарная относительная погрешность измерений:

$$\delta_{\text{и}} = 1,1 \sqrt{(0,31)^2 + (0,01)^2 + (0,1)^2 + (0,1)^2} = 0,374 \%$$

### Заключение

В результате проведенного метрологического анализа измерительного канала информационно-измерительной системы для определения экологического благополучия человека установлено, что суммарная относительная погрешность составляет не более 0,4 %, что является приемлемым значением для измерительного контроля.

### Список литературы

1. Юрков Н. К., Прошин А. А., Горячев Н. В. Синтез структуры многоканальной информационно-измерительной системы // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 64–71. doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-8
2. Иващук О. А. Технология интеллектуального мониторинга экологической ситуации // Образование, наука и производство. 2013. № 1. С. 26–34.
3. Жулев В. И., Чернов Е. И. Практикум по метрологии : учеб. пособие. М. : Курс, 2021. 125 с.
4. Шустов Ю. С., Плеханова С. В., Виноградова Н. А. Стандартизация и метрология : учебное пособие. М. : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2021. 167 с.
5. Ашанин В. Н., Исаев С. Г. Основы измерений в электрических цепях : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. 57 с.
6. Боккер П. Передача данных : Техника связи в системах телеобработки данных : в 2 т. / пер. с нем. С. М. Широкова ; под ред. Д. Д. Кловского. М. : Связь, 1980.
7. Руководство по эксплуатации датчика аммиака Energom-3001-NH3 // Компания ООО «Энергометрика». URL: <https://www.energometrika.ru/catalog/energom-3001-nh3-datchik-ammiaka.html> (дата обращения: 23.03.2023).

### References

1. Yurkov N.K., Proshin A.A., Goryachev N.V. Synthesis of the structure of a multichannel information and measurement system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):64–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-8
2. Ivashchuk O.A. Technology of intelligent monitoring of the ecological situation. *Obrazovanie, nauka i proizvodstvo = Education, science and production*. 2013;(1):26–34. (In Russ.)
3. Zhulev V.I., Chernov E.I. *Praktikum po metrologii: ucheb. posobie = Practical training in metrology: textbook*. Moscow: Kurs, 2021:125. (In Russ.)
4. Shustov Yu.S., Plekhanova S.V., Vinogradova N.A. *Standartizatsiya i metrologiya: ucheb. posobie = Standardization and metrology: textbook*. Moscow: RGU im. A.N. Kosygina, 2021:167. (In Russ.)

5. Ashanin V.N., Isaev S.G. *Osnovy izmereniy v elektricheskikh tsepyakh: ucheb. posobie = Fundamentals of measurements in electrical circuits : textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:57. (In Russ.)
6. Bokker P. *Peredacha dannykh: Tekhnika svyazi v sistemakh teleobrabotki dannykh: v 2 t. = Communication technology in data teleworking systems : in 2 vols*. Translated from German S.M. Shirokova. Moscow: Svyaz', 1980. (In Russ.)
7. Operating manual of the ammonia sensor EnergoM-3001-NH3. *Kompaniya OOO «Energometrika» = Energometrica LLC*. (In Russ.). Available at: <https://www.energometrika.ru/catalog/energom-3001-nh3-datchik-ammiaka.html> (accessed 23.03.2023).

#### *Информация об авторах / Information about the authors*

##### **Оксана Евгеньевна Безбородова**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой техносферной безопасности,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ot@pnzgu.ru

##### **Oksana E. Bezborodova**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
head of the sub-department of technosphere safety,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

##### **Олег Николаевич Бодин**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры технического  
управления качеством,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/  
ул. Гагарина, 1а/11)  
E-mail: bodin\_o@inbox.ru

##### **Oleg N. Bodin**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department  
of technical quality management,  
Penza State Technological University  
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,  
Penza, Russia)

##### **Николай Сергеевич Коваль**

доцент кафедры приборостроения  
и биомедицинской инженерии,  
Донской государственный  
технический университет  
(Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)  
E-mail: koval-nc@mail.ru

##### **Nikolai S. Koval**

Associate professor of the sub-department  
of instrumentation and biomedical engineering,  
Don State Technical University  
(1 Gagarina square, Rostov-on-Don, Russia)

##### **Алексей Анатольевич Трофимов**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: iit@pnzgu.ru

##### **Aleksey A. Trofimov**

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

##### **Алексей Валерьевич Григорьев**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: a\_grigorev@mail.ru

##### **Aleksey V. Grigoriev**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 22.03.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 21.04.2023**

**Принята к публикации / Accepted 22.05.2023**

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 334.021

doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-9

## МЕТОДИКА ОТЗЫВА НЕДОБРОКАЧЕСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ С ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО РЫНКА

Е. В. Кирюшкина<sup>1</sup>, И. А. Кострикина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

<sup>1</sup> elena230808@yandex.ru, <sup>2</sup> gmetr@niiemp.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальность предлагаемой методики отзыва недоброкачественной продукции с фармацевтического рынка определяется требованиями ГОСТ Р ИСО 9001–2015 и ГОСТ Р ИСО 10393–2014. Целью работы является выбор методов выявления недоброкачественной продукции на фармацевтическом рынке и разработка процедуры ее отзыва. *Материалы и методы.* Для решения данной задачи использовался метод матрицы последствий и вероятностей по показателям «вероятность риска» и «уровень влияния риска». *Результаты.* В ходе работы предложена методика отзыва недоброкачественной продукции с фармацевтического рынка, которая является составной частью системы менеджмента качества фармацевтической продукции. *Выводы.* Положительные результаты работы открывают перспективу эффективного применения методики в качестве основы при организации процесса управления отзывом на любом фармацевтическом производстве либо при совершенствовании существующего процесса.

**Ключевые слова:** отзыв, фармацевтический рынок, недоброкачественная продукция, эффективность отзыва, координатор отзыва, стратегия отзыва, категория отзыва

**Для цитирования:** Кирюшкина Е. В., Кострикина И. А. Методика отзыва недоброкачественной продукции с фармацевтического рынка // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 77–83. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-9

## PRODUCT REVIEW METHODOLOGY FROM THE PHARMACEUTICAL MARKET

E.V. Kiryushkina<sup>1</sup>, I.A. Kostrikina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

<sup>1</sup> elena230808@yandex.ru, <sup>2</sup> gmetr@niiemp.ru

**Abstract.** *Background.* The relevance of the proposed methodology for recalling substandard products from the pharmaceutical market is determined by the requirements of GOST R ISO 9001-2015 and GOST R ISO 10393-2014. The aim of the work is to choose methods for identifying poor-quality products in the pharmaceutical market and develop a procedure for recalling them. *Materials and methods.* To solve this problem, the method of the matrix of consequences and probabilities was used according to the indicators "risk probability" and "risk impact level". *Results.* In the course of the work, a methodology was proposed for recalling poor-quality products from the pharmaceutical market, which is an integral part of the quality management system for pharmaceutical products. *Conclusions.* The positive results of the work

open up the prospect of effective application of the methodology as a basis for organizing the recall management process in any pharmaceutical industry or for improving an existing process.

**Keywords:** recall, pharmaceutical market, substandard products, recall effectiveness, recall coordinator, recall strategy, recall category

**For citation:** Kiryushkina E.V., Kostrikina I.A. Product review methodology from the pharmaceutical market. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2023;(2):77–83. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-9

В настоящее время фармацевтические препараты все в большей степени входят в жизнь почти каждого человека, а в большинстве случаев и жизненно необходимы, поэтому для сохранения жизни и здоровья человечества очень важно, чтобы в обращении на фармацевтическом рынке были только качественные препараты. Однако не всегда это представляется возможным. Причинами возникновения некачественной продукции на фармацевтическом рынке могут быть: несовершенство технологического процесса, ошибки персонала, несоблюдение условий хранения и транспортировки, фальсификация продукции и т.п. В связи с этим предприятием-производителем необходимо как можно быстрее осуществить вывод забракованной продукции из обращения.

Таким образом, проведение предприятием-производителем своевременного и эффективного отзыва несоответствующей установленным требованиям продукции является залогом обеспечения жизни и здоровья потребителей, а также конкурентоспособности предприятия. Добиться этого возможно только с помощью грамотно организованной на предприятии системы менеджмента качества в части отзыва и участия в этом процессе квалифицированного персонала.

Авторами предлагается рассмотреть алгоритм процесса управления отзывом несоответствующей продукции с момента ее обнаружения до закрытия отзыва в системе менеджмента качества предприятия.

Согласно Приказу Минпромторга России от 14.06.2013 № 916 (ред. от 18.12.2015) «Об утверждении Правил надлежащей производственной практики» на каждом предприятии по производству фармацевтических препаратов должна быть организована система отзыва любой серии лекарственных средств из обращения.

Отзыв продукции (*product recall*) – корректирующее действие, предпринятое после производства, с целью защиты здоровья и безопасности потребителей в связи с использованием какой-либо продукции<sup>1</sup>.

Отзыв продукции может быть вызван разными причинами, например:

- отклонения и несоответствия, которые могли возникнуть в процессе производства, упаковки, маркировки, хранения и/или транспортировки продукции;
- несоответствующие результаты контроля качества продукции – результаты, выходящие за пределы спецификации (Out of Specification, OOS) и т. д.;
- подозрения или выявление фальсификации продукции;
- случаи фармаконадзора (получение информации о серьезных нежелательных реакциях, связанных с продукцией);
- получение уведомлений с предписанием осуществить отзыв от компетентных органов или держателей регистрационного удостоверения;
- и другие случаи, связанные с риском для потребителей/пациентов.

Решение об отзыве может быть принято по результатам расследования претензий [1].

Отзыв товаров с рынка может осуществляться по инициативе производителя, дистрибьютора, импортера или регуляторного органа.

На предприятии по производству лекарственных средств:

- должен быть назначен работник, ответственный за своевременный отзыв продукции с рынка и имеющий право привлекать необходимый для оценки и проведения отзыва персонал [2] – координатор отзыва;

- организована комиссия по работе с отзывами: комиссия I уровня, состоящая из председателя (в основном является руководителем отдела по обеспечению качества (проводит оценку

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 10393-2014. Отзыв потребительских товаров. Руководство для поставщиков.

необходимости проведения отзыва)) и членов комиссии (руководитель отдела контроля качества, представитель отдела обеспечения качества, главный технолог и другие в зависимости от вида рассматриваемого дефекта продукции) и комиссия II уровня, состоящая из руководителей высшего звена, например, директора по качеству, директора по производству, технического директора, главного инженера и др., согласно организационной структуре, председателем, как правило, является руководитель предприятия (принимается окончательное решение по отзыву)).

Условно процесс отзыва с фармацевтического рынка несоответствующей продукции можно разделить на два основных этапа:

- I этап: инициирование и обработка рекомендации по отзыву продукции;
- II этап: инициирование и проведение отзыва.

На этапе I проводится оценка необходимости инициации отзыва продукции.

Вся информация о продукте (наименование, номер серии, дата производства, срок годности, произведенное и реализованное количество упаковок), источник отзыва, причина отзыва (характер дефекта), результаты оценки отзыва (категория, глубина отзыва, угроза безопасности для пациента, определенная как часть опасности для здоровья, категория риска) отражаются исполнителем отзыва в «Рекомендации об отзыве продукции» (далее – Рекомендация об отзыве).

Оценка необходимости отзыва осуществляется комиссией по отзыву I уровня после подтверждения несоответствия требованиям нормативной документации или получения информации о нарушении качества.

Оценка отзыва включает:

- 1) оценку категории риска;
- 2) оценку опасности для здоровья человека (при необходимости);
- 3) проведение расследования;
- 4) определение категории и глубины отзыва.

После инициации отзыва продукции координатор отзыва совместно с комиссией по отзыву проводит оценку риска безопасности для здоровья пациента при применении препарата с определенным несоответствием согласно действующей на предприятии процедуре по управлению рисками.

Если в результате оценки риск для здоровья человека определен как:

– «Высокий» или «Критический» – координатор отзыва незамедлительно, но не позднее одного рабочего дня с момента проведения оценки, информирует о необходимости отзыва ФС Росздравнадзора и одновременно проводит дальнейшие действия по отзыву согласно действующей на предприятии процедуре по отзыву;

– «Низкий» – не позднее 10 рабочих дней от даты поступления информации о несоответствии проводит расследование и информирует об отзыве ФС Росздравнадзора [3] и другие заинтересованные стороны (если применимо).

По итогам оценки риска для здоровья пациента координатор отзыва при необходимости делает запрос в отдел Фармаконадзора на проведение оценки опасного воздействия для здоровья на основе характера дефектов.

В тех случаях, когда проблема качества продукции определяется по результатам, не соответствующим спецификациям (Out of Specification, OOS), оценка опасного воздействия для здоровья должна быть обязательной в целях оценки риска для безопасности пациентов.

Далее проводится расследование для выявления основной причины (причин) несоответствия согласно действующей на предприятии процедуре по управлению претензиями по качеству продукции.

Если проводились расследования подобных вопросов ранее, на них должна быть приведена ссылка.

Если «Предложение об отзыве продукции» было инициировано в результате расследования претензий на качество продукции/отклонений/результатов, не соответствующих спецификациям, координатор отзыва может сослаться на оценку риска/расследование, проведенное в связи с этими событиями в отношении качества, в записи по отзыву (при необходимости) и продолжить процесс отзыва.

На основании оценки риска, оценки опасного воздействия для здоровья и расследования, связанных с качеством событий, которые привели к отзыву продукции, координатор отзыва при

консультировании с комиссией по отзыву I уровня определяет «Категорию отзыва» и «Глубину отзыва».

Отзывы продукции можно категорировать следующим образом:

– **Категория I:** «Критическая» ситуация риска, при которой существует вероятность того, что использование или воздействие дефектного лекарственного средства может вызвать серьезный риск для здоровья, смерть или угрозу для жизни / постоянный ущерб.

– **Категория II:** «Значительная» ситуация риска, при которой существует разумная вероятность того, что использование или воздействие дефектного лекарственного средства может вызвать ненадлежащее лечение или вред для пациента, но не опасно для жизни и не приведет к постоянному ущербу и / или не потребует медицинского лечения.

– **Категория III:** «Незначительная» ситуация риска, при которой существует низкая вероятность того, что использование или воздействие дефектного лекарственного средства может вызвать неблагоприятные последствия для здоровья. Дефекты III класса не могут представлять серьезной опасности для здоровья, однако отзыв может быть инициирован по другим причинам, например, несоответствие регистрационного удостоверения.

Глубина отзыва – это уровень вывода продукции с рынка, определяемый исходя из категории отзыва (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость глубины отзыва от категории

Категория отзыва	Глубина отзыва
Категория I	До конечного потребителя, включая отдельных потребителей, врачей, больницы и т.д. (отзыв продукта осуществляется от дистрибьюторов, оптовых организаций, розничных торговцев и потребителей)
Категория II	До уровня розничных торговцев, т.е. отзыв до уровня непосредственной продажи препарата потребителям, который включает: аптеки, дистрибьюторов и розничных торговцев, больницы и т.д.
Категория III	До оптовых организаций / дистрибьюторов / складов, т.е. покупателей лекарственных препаратов

Рекомендацию об отзыве подписывает координатор отзыва и председатель комиссии по отзыву I уровня и передает на рассмотрение в комиссию II уровня.

Окончательное решение об отзыве принимает председатель комиссии II уровня по согласованию с членами комиссии.

Если членами комиссии II уровня принимается решение, что отзыв продукта не требуется, то председатель комиссии может отклонить «Рекомендацию об отзыве» с соответствующим обоснованием решения. В таком случае «Рекомендация об отзыве» с письменным обоснованием отклонения предложения возвращается председателю комиссии по отзыву I уровня, который закрывает «Рекомендацию об отзыве».

Отклонить «Рекомендацию об отзыве» возможно, если существует научное обоснование причины для отклонения и если необходимость отзыва возникла без участия регуляторных органов.

На этапе II проводится инициирование и проведение отзыва. Отзыв дефектной продукции с рынка осуществляется координатором отзыва сразу после утверждения «Рекомендации об отзыве».

Для идентификации координатор отзыва присваивает отзыву индивидуальный номер и регистрирует отзыв в журнале учета отзывов продукции.

Индивидуальный номер отзыву можно присвоить по следующей схеме:

*O-XX-ZZ-YYYY*,

где *O* – отзыв; *XX* – номер отзыва по порядку в течение года; *ZZ* – месяц, в котором был осуществлен отзыв; *YYYY* – год, в котором был осуществлен отзыв.

Например, O-01-05-2022.

В исключительных случаях, если возникла необходимость ускорить или инициировать коротким уведомлением процесс отзыва по директиве регуляторного органа из-за чрезвычайных

ситуаций и прочего, когда имеются ограничения во времени для выполнения последовательных этапов работ по отзыву, то отзыв может быть инициирован на I этапе расследования «Рекомендации об отзыве», после его утверждения председателем комиссии по отзыву II уровня.

После утверждения «Рекомендации об отзыве» координатор отзыва подготавливает Стратегию отзыва при сотрудничестве с комиссией по отзыву I уровня.

В Стратегии отзыва приводится информация об отзыве, полученная на этапе расследования, категория и глубина отзыва, категория риска, серия, список получателей, отзываемой продукции, количество, реализованное получателю и решение в отношении недоброкачественной продукции.

При принятии решения об уничтожении / переупаковке (корректировке) отозванной продукции до включения в Стратегию отзыва комиссия по отзыву I уровня должна учесть, что для лекарственных средств допускается только частичное или полное исправление вторичной упаковки. При этом должно быть обеспечено надлежащее хранение отозванного продукта и обеспечено 100-процентное соответствие качества требованиям нормативной документации. Все решения по исправлению лекарственных средств должны быть согласованы с руководством предприятия и получено разрешение от руководителя Федеральной службы Росздравнадзора.

После утверждения председателем комиссии I уровня Стратегии отзыва, но не позднее 10 дней от даты подтверждения несоответствия (ст. 38 ФЗ «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27.12.2002 г.) координатор отзыва:

– направляет письмо в Федеральную службу Росздравнадзора о принятом решении отзыва конкретного продукта с фармацевтического рынка с указанием причины отзыва, декларации о соответствии требованиям нормативного документа, программы мероприятий по предотвращению причинения вреда в связи с выявленным несоответствием и просьбой размещения информации об отзыве на официальном сайте Федеральной службы Росздравнадзора;

– направляет уведомления фирмам-потребителям (посредством электронной почты с запросом обратной связи о прочтении или почты России (заказное письмо с уведомлением о получении)) или любым другим способом, позволяющим оперативно довести информацию о принятом производителем решении отозвать с фармацевтического рынка конкретную серию препарата и необходимости ее возврата на склад предприятия-производителя с приложением «Карты ответа по отзыву» для последующего заполнения и предоставления информации о статусе отзыва.

Затем проводится проверка эффективности процесса уведомления об отзыве. Цель проверки эффективности процесса уведомления об отзыве проводится согласно информации, представленной в Стратегии отзыва, и состоит в том, чтобы удостовериться в том, что уведомление об отзыве было получено потребителями, что получатели уведомлений изучили и поняли информацию, содержащуюся в уведомлении, и следовали представленным в нем инструкциям.

Методика проверки эффективности процесса уведомления об отзыве определяется предприятием.

Координатор отзыва завершает этапы проверок эффективности, которые должны быть выполнены, например, следующим образом:

этап *A* – оповестить 100 % получателей и получить обратную связь от них;

этап *B* – связаться от более 10 % до менее 100 % от общего количества получателей (этот процент определяется и зависит от конкретного случая);

этап *C* – связаться с 10 % от общего количества получателей;

этап *D* – связаться с 5 % от общего количества получателей;

этап *E* – проверка эффективности не требуется.

Этап проверки эффективности уведомления об отзыве определяется исходя из следующей информации, но не ограничиваясь:

– тип продукции, категория и глубина отзыва, этап, до которого завершилось распределение. Например: Принято решение об отзыве некоего продукта *X*, который относится к категории отзыва I. Определено, что для него может потребоваться проверка эффективности до «Этапа *A*», если он был распространен за пределы розничного уровня и существует опасность с риском для жизни пациента. В то же время для другого продукта *Y*, который также относится к категории отзыва I, может быть достаточной проверка эффективности этапа «*B*», если она была распространена только оптовым организациям;

– проверка эффективности согласно этапу должна быть завершена комиссией по отзыву I в рамках стратегии отзыва.

Координатор отзыва:

– периодически осуществляет контроль над своевременным предоставлением фирмами-потребителями «Карт ответа по отзыву». Если необходимо, делает повторные запросы. Контроль осуществляется до того момента, пока количество возвратов не уменьшится до незначительного числа относительно общего количества продукта, реализованного в адрес конкретного потребителя (например, непрерывное отслеживание с определенной периодичностью до трех месяцев приводит либо к нулевым либо к незначительным возвратам). Чем больше будет возвращено отзываемой продукции, тем результативнее процесс отзыва;

– периодически проверяет статус отзыва продукции на основе полученных «Карт ответов по отзыву» и составляет сводный отчет о состоянии отзыва, сопоставляя предполагаемые возвраты и данные по стратегии отзыва с фактическими возвратами, полученными к настоящему моменту;

– осуществляет контроль над уничтожением или исправлением отозванного продукта с регулярным обновлением статуса, используя «Карты ответа по отзыву».

Работа с отозванными партиями продукции осуществляется в соответствии с требованиями действующей на предприятии процедуры по управлению продукцией, несоответствующей установленным требованиям, возвращенной с рынка.

Все возвращенные продукты должны находиться на строгом карантине до тех пор, пока они не будут помещены в специально отведенное безопасное и изолированное место для хранения отозванных продуктов.

Партии, подлежащие отзыву в странах экспорта, могут быть уничтожены в соответствующих странах с предоставлением документации предприятию-производителю, подтверждающей факт уничтожения возвращенной продукции. Аналогично, если затраты по транспортировке забракованной продукции от фирмы-потребителя производителю будут значительными, то по согласованию допускается уничтожение забракованной продукции фирмой-потребителем с привлечением специализированной организации и предоставлением подтверждающей документации производителю. В данных случаях затраты за уничтожение забракованной продукции возмещает производитель.

После того, как все карты ответов закрыты, осуществляется процесс по уничтожению отозванной продукции или назначаются лица, ответственные за процесс переупаковки, координатор отзыва готовит сводный отчет по отзыву, который содержит итоговую информацию и действия, произведенные в отношении отозванной продукции.

Окончательный отчет о сверке направляется председателю комиссии по отзыву I уровня для рассмотрения и утверждения.

Информация о проведении отзыва предоставляется в регуляторные органы по требованию.

Деятельность по отзыву продукции может считаться завершенной и закрытой по истечении установленного предприятием-производителем времени (например, по истечении 90 дней) от даты направления в Федеральную службу Росздравнадзора / компетентные органы других стран официального уведомления об отзыве из обращения на фармацевтическом рынке конкретной серии препарата и одобрения председателем комиссии по отзыву I уровня сводного отчета о сверке либо ранее – после получения удовлетворительной сверки по «Картам ответа по отзыву».

Представленный порядок реагирования в случае необходимости отзыва забракованной продукции предприятием-изготовителем можно использовать в качестве основы при организации процесса управления отзывом на любом фармацевтическом производстве либо при совершенствовании существующего процесса.

Учитывая жесткие требования к качеству фармацевтической продукции, как на этапах производства, так и на стадии реализации, данный алгоритм отзыва забракованной продукции с рынка может быть применим также в любой другой отрасли [4, 5].

#### *Список литературы*

1. Морозов К. Спасибо за ваш отзыв! Организация отзыва продукции в соответствии с требованиями GMP : экспертный материал. URL: <https://pharmprom.ru/spasibo-za-vash-otzyv-organizaciya-otzyva-produkcii-v-sootvetstvii-s-trebovaniyami-gmp/>

2. Об обращении лекарственных средств : федер. закон № 61-ФЗ от 12.04.2010 (ред. от 14.07.2022).
3. О техническом регулировании : федер. закон № 184-ФЗ от 27.12.2002.
4. Об утверждении Правил надлежащей производственной практики : приказ Минпромторга России № 916 от 14.06.2013 (ред. от 18.12.2015).
5. Отзыв продукции. URL: <https://www.mendeleevtest.ru/resursy-kachestva/otzyv-produkcii>

### References

1. Morozov K. *Spasibo za vash otzyv! Organizatsiya otzyva produktsii v sootvetstvii s trebovaniyami GMP: ekspertnyy material = Thank you for your feedback! Organization of product recall in accordance with GMP requirements : expert material.* (In Russ.). Available at: <https://pharmprom.ru/spasibo-za-vash-otzyv-organizatsiya-otzyva-produkcii-v-sootvetstvii-s-trebovaniyami-gmp/>
2. *About the circulation of medicines : feder. Law No. 61-FZ of 12.04.2010 (ed. of 14.07.2022).* (In Russ.)
3. *On technical regulation : feder. Law No. 184-FZ of 27.12.2002.* (In Russ.)
4. *On the approval of the Rules of Good Manufacturing Practice: Order of the Ministry of Industry and Trade of Russia No. 916 dated 14.06.2013 (ed. dated 18.12.2015).* (In Russ.)
5. *Otzyv produktsii = Product recall.* (In Russ.). Available at: <https://www.mendeleevtest.ru/resursy-kachestva/otzyv-produkcii>

### Информация об авторах / Information about the authors

**Елена Васильевна Кирюшкина**

магистрант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: elena230808@yandex.ru

**Elena V. Kiryushkina**

Master degree student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Инна Анатольевна Кострикина**

кандидат технических наук,  
главный метролог,  
Научно-исследовательский институт  
электронно-механических приборов,  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)  
E-mail: gmetr@niiemp.ru

**Inna A. Kostrikina**

Candidate of technical sciences, chief metrologist,  
Scientific Research Institute  
of Electronic and Mechanical Devices  
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 02.02.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 02.03.2023**

**Принята к публикации / Accepted 03.04.2023**

# ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 615.47

doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-10

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УШНОГО ПУЛЬСОКСИМЕТРА В ТЕЛЕМЕДИЦИНЕ

А. О. Григорьев<sup>1</sup>, Д. С. Лобов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Московский государственный институт международных отношений, Москва, Россия

<sup>1,2</sup> lobov.mgimo@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В условиях пандемии вырос спрос на неинвазивную диагностику пациентов с применением пульсоксиметров, также значительное развитие получили технологии телемедицины. Учитывая данные тренды, авторы поставили перед собой цель проанализировать принципы работы современных устройств для неинвазивной диагностики здоровья, определить возможности для их совершенствования. *Материалы и методы.* Авторы провели исследование в области патентной активности, изучили принципы работы ряда зарубежных устройств. *Результаты.* В результате проведенной работы удалось прийти к выводу о том, что предлагаемые устройства в области неинвазивной диагностики морально устарели и не соответствуют требованиям современных клиентов: крепление зонда на пальцах исключает возможность применения устройств рядом пациентов, например, страдающих болезнью Рейно, а отсутствие беспроводной передачи данных снижает комфортность использования. *Выводы.* Авторы предлагают обратить внимание на концепцию ушного пульсоксиметра, позволяющего обеспечить комфортную неинвазивную диагностику пациентов с применением беспроводной связи и методов автоматической обработки данных.

**Ключевые слова:** ушной пульсоксиметр, неинвазивная диагностика, сомнология

**Для цитирования:** Григорьев А. О., Лобов Д. С. Перспективы применения ушного пульсоксиметра в телемедицине // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 84–88. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-10

## PROSPECTS FOR APPLICATION OF EAR PULSE OXIMETER IN TELEMEDICINE

A.O. Grigoriev<sup>1</sup>, D.S. Lobov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Moscow State Institute of International Relations, Moscow, Russia

<sup>1,2</sup> lobov.mgimo@mail.ru

**Abstract.** *Background.* In the context of the pandemic, the demand for non-invasive diagnostics of patients using pulse oximeters has increased, and telemedicine technologies have also received significant development. Given these trends, the authors set themselves the goal of analyzing the principles of operation of modern devices for non-invasive health diagnostics and identifying opportunities for their improvement. *Materials and methods.* The authors conducted a study in the field of patent activity, studied the principles of operation of a number of foreign devices. *Results.* As a result of the work carried out, it was possible to come to the conclusion that the proposed devices in the field of non-invasive diagnostics are obsolete and do not meet the requirements of modern customers: mounting the probe on the fingers excludes the possibility of using devices by a number of patients, for example, those suffering from Raynaud's disease, and the lack of wireless data transmission reduces comfort of use. *Conclusions.* The authors propose to pay attention to the concept of an

ear pulse oximeter, which makes it possible to provide comfortable non-invasive diagnostics of patients using wireless communication and automatic data processing methods.

**Keywords:** ear pulse oximeter, non-invasive diagnostics, somnology

**For citation:** Grigoriev A.O., Lobov D.S. Prospects for application of ear pulse oximeter in telemedicine. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):84–88. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-10

### *Введение*

Актуальность вопросов совершенствования устройств, позволяющих осуществлять диагностику одышки, сатурации, значительно выросла в результате распространения вирусной пневмонии COVID-19 [1]. Основным устройством, применяемым сегодня для проведения неинвазивной диагностики, является пульсоксиметр, фиксируемый на пальце пациента.

Несмотря на высокую точность и эргономичность классического пульсоксиметра, возможности его применения ограничены для пациентов с рядом медицинских заболеваний. Так, например, традиционный пульсоксиметр не может быть использован для диагностики пациентов с болезнью Рейно [2, 3] – вазоспастическим заболеванием, представляющим собой ангиотрофоневроз с преимущественным поражением мелких концевых артерий и артериол.

Кроме того, функциональность и точность показателей традиционного пульсоксиметра снижаются в особых профессиональных условиях, например, при применении устройства для диагностики состояния экипажей боевых самолетов в условиях перегрузки, участников экспедиций [4, 5]. Возможность фиксации устройства на пальце в данных условиях также ограничена.

Цель данной работы заключается в разработке инклюзивной концепции пульсоксиметра, обеспечивающей удобство в применении различными видами пользователей, особенно в условиях, исключающих возможность использования традиционных решений.

### *Задачи исследования*

Для достижения поставленной цели работы авторы решили следующие исследовательские задачи:

- 1) проанализировали устройство приборов в области неинвазивной диагностики в зарубежных патентных документах;
- 2) разработали концепцию альтернативного устройства.

### *Результаты исследования*

Подробный анализ принципа работы устройств в области неинвазивной диагностики подтверждает гипотезу авторов о моральном устаревании. Согласно RU2548791C2 [6], RU2302196C2 [7] контроль физиологического состояния или его изменения при определении здоровья субъекта осуществляется при помощи зонда, надеваемого на периферийные части тела – палец ноги или руки человека, для измерения сигналов периферического пульса, связанного с большим кругом кровообращения. Кольцевая манжета для измерения давления заведомо вызывает расширение вен и депонирование венозной крови дистально от места приложения давления. Недостатком обоих устройств является дискомфорт, вызываемый у пациентов в ходе сна, при использовании зонда на пальцах ноги и руки.

Одним из решений является разработка специализированного устройства, применение которого возможно в случаях, когда функциональность традиционного пульсоксиметра ограничена. Такой альтернативой является ушной пульсоксиметр. Ушной пульсоксиметр фиксируется на мочке при помощи клипсы, позволяя измерять насыщение кислородом и частоту сердечных сокращений.

Концепция «ушного пульсоксиметра» – альтернативы традиционного пульсоксиметра, фиксируемого на пальце, имеет довольно длинную историю. В разработке устройств принимают участие такие крупные компании, как Hewlett-Packard [8].

Несмотря на актуальность устройства, статистика базы данных патентов Google patent [9] по ключевому слову «Ear pulse oximeter» говорит о снижении числа защищаемых результатов интеллектуальной деятельности с 2000 по 2020 гг.:

– 2000–2010 гг.: 16 ед.;

– 2011–2020 гг.: 6 ед.

Данная ситуация приводит к тому, что продукты – ушные пульсоксиметры – не соответствуют требованиям современных пациентов: отсутствует возможность автономной работы, нет подключения устройства к телефону с записью результатов диагностики и т.д. Большинство устройств передают данные при помощи проводов, без применения Bluetooth модуля. Недостатком устройств, например US5611337A [10], применяющих зонд, размещающийся на ухе человека, является отсутствие соответствующих компонентов в устройстве, обеспечивающих беспроводную передачу собираемых устройством данных для их обработки и хранения на внешних источниках.

Моральное устаревание ушных пульсоксиметров и актуальность их применения в отдельных рыночных нишах определяют необходимость модернизации устройства. Авторами предлагается решение, которое позволит совместить функционал пульсоксиметра с современными технологиями передачи и хранения данных. Устройство включает держатель для уха, корпус с модулями, а также клипсу с компонентами пульсоксиметра.

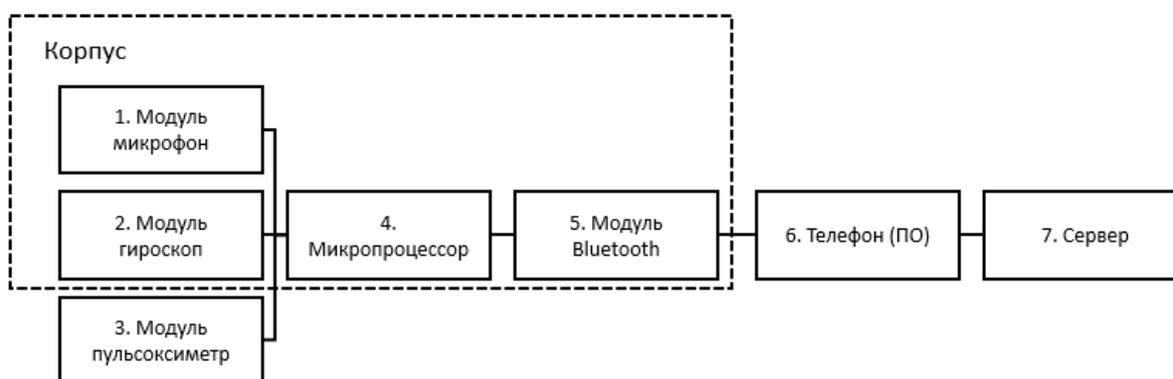


Рис. 1. Элементы устройства «Ушной пульсоксиметр», обеспечивающие неинвазивный сбор и обработку диагностических данных

Устройство оснащено модулем Bluetooth, батареей, что обеспечивает его автономность. Возможно включение модуля «гироскоп», а также модуля «микрофон» для повышения функционала устройства и применения в целях диагностики качества сна пациентов. В условиях развития телемедицины такой функционал является необходимым для формирования клиентоцентричного подхода при работе с пациентами [11].

Данные собираются устройством и передаются при помощи Bluetooth для дальнейшей обработки на телефоне клиента, на котором установлено соответствующее программное обеспечение. ПО предоставляет результаты анализа данных пациенту, не являющиеся медицинским заключением. Передача данных пациента возможна на соответствующий сервер с предоставлением доступа медицинским специалистам для оказания телемедицинских услуг и содействия в постановке диагноза. Возможно применение инструментов больших данных и искусственного интеллекта для совершенствования качества обслуживания.

### Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать вывод о том, что сегодня на рынке отсутствуют инклюзивные современные решения, обеспечивающие возможность комфортной неинвазивной диагностики сатурации, качества сна пациентов. Концепции наиболее распространенных приборов были разработаны в начале 2000-х гг., исключают применение беспроводных технологий передачи данных, инструментов Big Data и AI при разработке рекомендаций для пациентов, что не соответствует технологическим трендам в области телемедицины. Обязательное применение зонда на периферийных частях тела (пальцах ноги или руки человека) ограничивает возможность использования устройств пациентами с болезнью Рейно. Авторы предлагают собственную концепцию устройства, сочетающего в себе функционал пульсоксиметра и приборов в области диагностики сна, обеспечивающего комфортное применение в сложных условиях, когда закрепление зонда на пальцах пациента невозможно. Применение данного устройства, по мнению авторов, является актуальным в условиях развития рынка телемедицины и беспроводных технологий.

## Список литературы

1. Гришин О. В., Гришин В. Г. Клиническое значение пульсоксиметрии у взрослых // Медицинский алфавит. 2020. № 20. С. 13–21.
2. Kurki T. S., Piirainen H. I., Kurki P. T. Non-invasive monitoring of finger arterial pressure in patients with Raynaud's phenomenon: effects of exposure to cold // *Br J Anaesth.* 1990. Vol. 65. P. 558–563. doi: 10.1093/bja/65.4.558. PMID: 2248827
3. Rakesh G., Sadaanand V. Pulse oximetry in scleroderma patients: Concerns // *Acta anaesthesiologica Scandinavica.* 2008. Vol. 52. P. 1303–1304. doi: 10.1111/j.1399-6576.2008.01720.x
4. Ledderhos C., Heise R., Gammel C., Gens A. "Inflight" – Messungen der Sauerstoffsättigung bei Höhenflügen im Himalaya und den französischen Alpen im Rahmen des "Mountain Wave Project" (MWP). URL: <https://wehrmed.de/humanmedizin/inflight-messungen-der-sauerstoffsattigung-bei-hoehenfluegen-im-himalaya-den-franzoesischen-alpen-im-rahmen-des-mountain-wave-project-mwp.html>
5. Decker M. J., Dickensheets D., Arnold J. L. et al. A comparison of a new reflectance oximeter with the Hewlett-Packard ear oximeter // *Biomed Instrum Technol.* 1990. Vol. 24. P. 122–126. PMID: 2322755.
6. Kramer M., Lobbstaal A., Barten E. et al. Wearable Pulse Oximetry Measurements on the Torso, Arms, and Legs: A Proof of Concept // *Military Medicine.* 2017. Vol. 182. P. 92–98. doi: 10.7205/MILMED-D-16-00129
7. Google patents. URL: <https://patents.google.com>
8. Пат. 2548791С2 РФ, МПК6 А61В 5/02. Неинвазивный способ и устройство для определения стадий поверхностного и глубокого сна / Гершковичи-Коэн С., Шеффи Я. № 2010146145/14 ; заявл. 13.04.2009 ; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11
9. Пат. 2005103835А РФ, МПК6 А 61 В 5/02, 5/026, 5/0402, 5/145 Накожный зонд, устройство и способ для неинвазивного определения состояния здоровья / Шналл П. Р. № 2005103835/14 ; заявл. 15.07.2003 ; опубл. 22.01.2004.
10. US5611337А Bukta A., inventor; Koninklijke Philips NV, assignee. *Pulsoximetry ear sensor.* 1994.
11. Гранина Т. А., Велимухаметов О. И., Вешкурцева Е. Д., Хитрич А. В. Телемедицина в условиях пандемии Covid-19 // *Университетская медицина Урала.* 2021. № 2. С. 45–47.

## References

1. Grishin O.V., Grishin V.G. Clinical significance of pulse oximetry in adults. *Meditinskiy alfavit = Medical alphabet.* 2020;(20):13–21. (In Russ.)
2. Kurki T.S., Piirainen H.I., Kurki P.T. Non-invasive monitoring of finger arterial pressure in patients with Raynaud's phenomenon: effects of exposure to cold. *Br J Anaesth.* 1990;65:558–563. doi: 10.1093/bja/65.4.558 . PMID: 2248827
3. Rakesh G., Sadaanand V. Pulse oximetry in scleroderma patients: Concerns. *Acta anaesthesiologica Scandinavica.* 2008;52:1303–1304. doi: 10.1111/j.1399-6576.2008.01720.x
4. Ledderhos C., Heise R., Gammel C., Gens A. "Inflight" – Messungen der Sauerstoffsättigung bei Höhenflügen im Himalaya und den französischen Alpen im Rahmen des "Mountain Wave Project" (MWP). Available at: <https://wehrmed.de/humanmedizin/inflight-messungen-der-sauerstoffsattigung-bei-hoehenfluegen-im-himalaya-den-franzoesischen-alpen-im-rahmen-des-mountain-wave-project-mwp.html>
5. Decker M.J., Dickensheets D., Arnold J.L. et al. A comparison of a new reflectance oximeter with the Hewlett-Packard ear oximeter. *Biomed Instrum Technol.* 1990;24:122–126 . PMID: 2322755
6. Kramer M., Lobbstaal A., Barten E. et al. Wearable Pulse Oximetry Measurements on the Torso, Arms, and Legs: A Proof of Concept. *Military Medicine.* 2017;182:92–98. doi: 10.7205/MILMED-D-16-00129
7. *Google patents.* Available at: <https://patents.google.com>
8. Patent 2548791C2 Russian Federation, IPC6 A61B 5/02. *Neinvazivnyy sposob i ustroystvo dlya opredeleniya stadiy poverkhnostnogo i glubokogo sna = A non-invasive method and device for determining the stages of superficial and deep sleep.* Gershkovichi-Koen S., Sheffi Ya. № 2010146145/14; appl. 13.04.2009; publ. 20.04.2015, Bull. № 11. (In Russ.)
9. Patent 2005103835A Russian Federation, IPC6 A 61 B 5/02, 5/026, 5/0402, 5/145. *Nakozhnyy zond, ustroystvo i sposob dlya neinvazivnogo opredeleniya sostoyaniya zdorov'ya = Skin probe, device and device for non-invasive determination of health status.* Shnall P.R. № 2005103835/14; appl. 15.07.2003; publ. 22.01.2004. (In Russ.)
10. US5611337A Bukta A., inventor; Koninklijke Philips NV, assignee. *Pulsoximetry ear sensor.* 1994.
11. Granina T.A., Velimukhametov O.I., Veshkurtseva E.D., Khitrich A.V. Telemedicine in the conditions of the Covid-19 pandemic. *Universitetskaya meditsina Urala = University Medicine of the Urals.* 2021;(2):45–47. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Александр Олегович Григорьев**

магистрант,  
Московский государственный институт  
международных отношений  
(Россия, г. Москва, просп. Вернадского, 76)  
E-mail: lobov.mgimo@mail.ru

**Aleksandr O. Grigoriev**

Master degree student,  
Moscow State Institute of International Relations  
(76 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Даниил Сергеевич Лобов**

кандидат экономических наук,  
кафедра управления инновациями,  
Московский государственный институт  
международных отношений  
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 76)  
E-mail: lobov.mgimo@mail.ru

**Daniil S. Lobov**

Candidate of economical sciences,  
sub-department of innovation management,  
Moscow State Institute of International Relations  
(76 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 27.01.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 27.02.2023**

**Принята к публикации / Accepted 26.03.2023**

УДК 517.977: 519.21: 621.396: 621.37  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-11

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СИСТЕМЕ РЕГИСТРАЦИИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТВЕДЕНИЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

А. С. Батяев<sup>1</sup>, О. Н. Бодин<sup>2</sup>, Чьонг Тхи Лан Нхи<sup>3</sup>, М. Н. Крамм<sup>4</sup>, А. Ю. Бодин<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

<sup>3,4,5</sup> Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

<sup>1</sup> batayev81@gmail.com, <sup>2</sup> bodin\_o@inbox.ru, <sup>3</sup> truongthilannhi@gmail.com, <sup>4</sup> KrammMN@mail.ru, <sup>5</sup> Bodin98@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматриваются особенности оценки электромагнитной совместимости в системе регистрации множественных отведений электрокардиосигнала. По мнению авторов, регистрация множественных отведений электрокардиосигнала при скрининговых обследованиях достаточно информативна для пространственного представления электрической активности сердца. В связи с большим количеством электродов потенциально возможны существенные временные затраты на установку электродов. При этом усложняющим фактором является необходимость установки электродов в соответствующих местах торса при имеющемся разбросе размеров торса пациентов. *Материалы и методы.* Авторами предлагается оригинальная, защищенная патентом, система регистрации множественных отведений электрокардиосигнала, конструктивно выполненная в виде жилета с электродами, заранее предустановленными (закрепленным) на его внутренней поверхности и в которой осуществляется беспроводная передача цифрового кода электрокардиосигналов. Ставится и решается задача электромагнитной совместимости в системе регистрации множественных отведений электрокардиосигнала на внутриаппаратурном уровне. При решении задачи электромагнитной совместимости в системе регистрации множественных отведений электрокардиосигнала учитываются особенности конструкции и технологии производства жилета с предустановленными электродами. *Результаты и выводы.* Благодаря применению жилета с предустановленными электродами повышается эффективность диагностики состояния сердца при скрининговом обследовании.

**Ключевые слова:** скрининговая электрокардиодиагностика, регистрации множественных отведений электрокардиосигнала, помехи при регистрации множественных отведений электрокардиосигнала, электромагнитная совместимость, методика расчета электромагнитной совместимости

**Для цитирования:** Батяев А. С., Бодин О. Н., Чьонг Тхи Лан Нхи, Крамм М. Н., Бодин А. Ю. Обеспечение электромагнитной совместимости в системе регистрации множественных отведений электрокардиосигнала // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 89–96. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-11

## PROVISION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN THE REGISTRATION SYSTEM OF MULTIPLE ELECTROCARDIAC SIGNAL LEADS

A.S. Batyaev<sup>1</sup>, O.N. Bodin<sup>2</sup>, Truong Thi Lan Nhi<sup>3</sup>, M.N. Kramm<sup>4</sup>, A.Yu. Bodin<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> Penza State Technological University, Penza, Russia

<sup>3,4,5</sup> National Research University «MPEI», Moscow, Russia

<sup>1</sup> batayev81@gmail.com, <sup>2</sup> bodin\_o@inbox.ru, <sup>3</sup> truongthilannhi@gmail.com, <sup>4</sup> KrammMN@mail.ru, <sup>5</sup> Bodin98@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The article is devoted to the peculiarities of the assessment of electromagnetic compatibility in the registration system of multiple leads of the electrocardiosignal. According to the authors, the registration of multiple leads of the electrocardiosignal during screening examinations is quite informative for the spatial representation of the electrical activity of the heart. Due to the large number of electrodes, significant time costs for the installation of electrodes are potentially possible. At the same time, a complicating factor is the need to install electrodes in the corresponding places of the torso with the existing variation in the size of the patient's torso. *Materials and methods.* The authors propose an original, patent-protected system for recording multiple leads of an electrocardiosignal, structurally made in the form

of a vest with electrodes pre-installed (fixed) on its inner surface and in which a digital code of electrocardiosignals is transmitted wirelessly. The problem of electromagnetic compatibility in the system for recording multiple derivations of the electrocardiosignal at the internal hardware level is posed and solved. When solving the problem of electromagnetic compatibility in the system for recording multiple leads of the electrocardiosignal, the design features and production technology of the vest with pre-installed electrodes are taken into account. *Results and conclusions.* Thanks to the use of a vest with pre-installed electrodes, the efficiency of diagnosing the state of the heart during a screening examination increases.

**Keywords:** screening electrocardiodiagnostics, registration of multiple leads of the electrocardiosignal, interference in the registration of multiple leads of the electrocardiosignal, electromagnetic compatibility, method for calculating electromagnetic compatibility

**For citation:** Batyaev A.S., Bodin O.N., Truong Thi Lan Nhi, Kramm M.N., Bodin A.Yu. Provision of electromagnetic compatibility in the registration system of multiple electrocardiac signal leads. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):89–96. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-11

### Введение

Согласно ГОСТ 23611–79 под электромагнитной совместимостью радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС) понимается «Способность радиоэлектронных средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных радиопомех и не создавать недопустимых радиопомех другим радиоэлектронным средствам»<sup>1</sup>.

Задача обеспечения ЭМС РЭС сохраняет свою актуальность при:

- непрерывном возрастании общего числа РЭС;
- усложнении сигнально-помеховой обстановки из-за усложнения функций и состава РЭС, сосредоточении различных видов РЭС в ограниченном пространстве и миниатюризации РЭС.

Меры по обеспечению ЭМС подразделяются на организационные и технические. К организационным относятся: применение пространственного разделения (разноса) РЭС – одновременного использования одних и тех же частотных диапазонов в различных зонах земного шара, если это не грозит взаимными радиопомехами; временного разноса – поочередной работы РЭС на одной несущей частоте по определенной программе во времени: частотного разноса – одновременной работы на различных несущих частотах и др. К техническим относятся: создание радиопередающих и электротехнических устройств, более совершенных с точки зрения уменьшения мешающих излучений; разработка радиоприемных устройств, обладающих меньшей чувствительностью к таким излучениям и др. [1–3].

Целью статьи является разработка технических мер по обеспечению электромагнитной совместимости в системе регистрации множественных отведений электрокардиосигнала.

### Постановка проблемы

Причин возникновения помех при регистрации электрических полей сердца электрокардиографом много [4]. При регистрации множественных отведений электрокардиосигнала (ЭКС) межэлектродные наводки неизбежны. Интенсивность помех при регистрации множественных отведений ЭКС определяется количеством и взаимным расположением в пространстве электродов, мощностью электрокардиосигнала и т.д. [5, 6]. Основными источниками помех при регистрации множественных отведений ЭКС являются плохой электрический контакт между кожей и электродами, индуктивное и емкостное воздействия.

### Плохой электрический контакт между кожей и электродами

«Плавающая изолиния» на ЭКГ свидетельствует о наличии плохого электрического контакта между кожей и электродами. Причина плохого электрического контакта между кожей и электродами устраняется нанесением на кожу пациента проводящего геля в местах наложения электродов.

<sup>1</sup> ГОСТ 23611–79. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Термины и определения.

Также плохой электрический контакт между кожей и электродами возможен из-за коррозии электродов, вызванной неправильной очисткой электродов и высыханием проводящего геля на поверхности электродов.

Некачественный или поврежденный электрод, в первую очередь, ловит малейшие наводки.

### *Индуктивное воздействие*

Вокруг каждого проводника с током создается магнитное поле  $B$ , которое пропорционально току в проводнике  $I_L$ . Если это магнитное поле пронизывает перпендикулярно к нему расположенный проводящий контур, то при изменении напряженности магнитного поля там индуцируется напряжение (принцип трансформатора). Напряжение пропорционально площади проводящего контура и изменению напряженности магнитного поля. Это означает, что напряжение помехи индуцируется, только если изменяется сила тока в цепи нагрузки.

### *Емкостное воздействие*

Две соседние линии обладают паразитной емкостью. Если на одной из линий происходит изменение напряжения, то через паразитную емкость  $C_p$  ток помехи  $I_S$  течет в соседнюю линию и вызывает на измерительном сопротивлении напряжение помехи. Для тока помехи действует следующая формула:  $I_S = C_p \Delta U / \Delta t$ .

Обеспечение электромагнитной совместимости при регистрации множественных отведений электрокардиосигнала сводится к созданию условий для нормальной совместной эксплуатации электродов.

### *Материалы и методы*

В работе рассмотрены вопросы построения системы электрокардиологического скрининга на основе регистрации множественных отведений ЭКС, одним из основных блоков которой является модуль регистрации множественных отведений ЭКС (МРМО), содержащий аналоговую и цифровую части [7] (рис. 1). При этом аналоговая часть включает:

- узел регистрации электрокардиосигналов с электродами, закрепленными определенным образом с внутренней стороны жилета и расположенными равномерно по длине контура поперечного сечения торса в ряды;
- жгут, изделие, состоящее из изолированных и экранированных проводников, закрепленных определенным образом на жилете, наконечников проводников, подключаемых к электродам, и разъема для подключения к другим узлам модуля регистрации множественных отведений ЭКС [9];
- узел защиты от импульсов дефибриллятора;
- узел усиления электрокардиосигналов;
- узел определения обрыва электродов при регистрации электрокардиосигналов;
- мультиплексор, предназначенный для переключения одного из зарегистрированных электрокардиосигналов с входных линий на одну общую выходную линию с помощью управляющего сигнала, а цифровая часть содержит:
  - аналого-цифровой преобразователь электрокардиосигналов;
  - первое вычислительное устройство;
  - блок индикации и контроля;
  - внешнее запоминающее устройство;
  - радиоприемопередатчик.

Одним из основных узлов модуля регистрации множественных отведений ЭКС (МРМО) является узел электродов, ориентированный на сокращение временных затрат при установке электродов и учет необходимости установки электродов в соответствующих местах торса при имеющемся разбросе размеров торса пациентов. Для решения этой задачи предлагается осуществлять надевание обследуемым жилета с электродами, заранее предустановленными (закрепленными) на его внутренней поверхности (рис. 2).

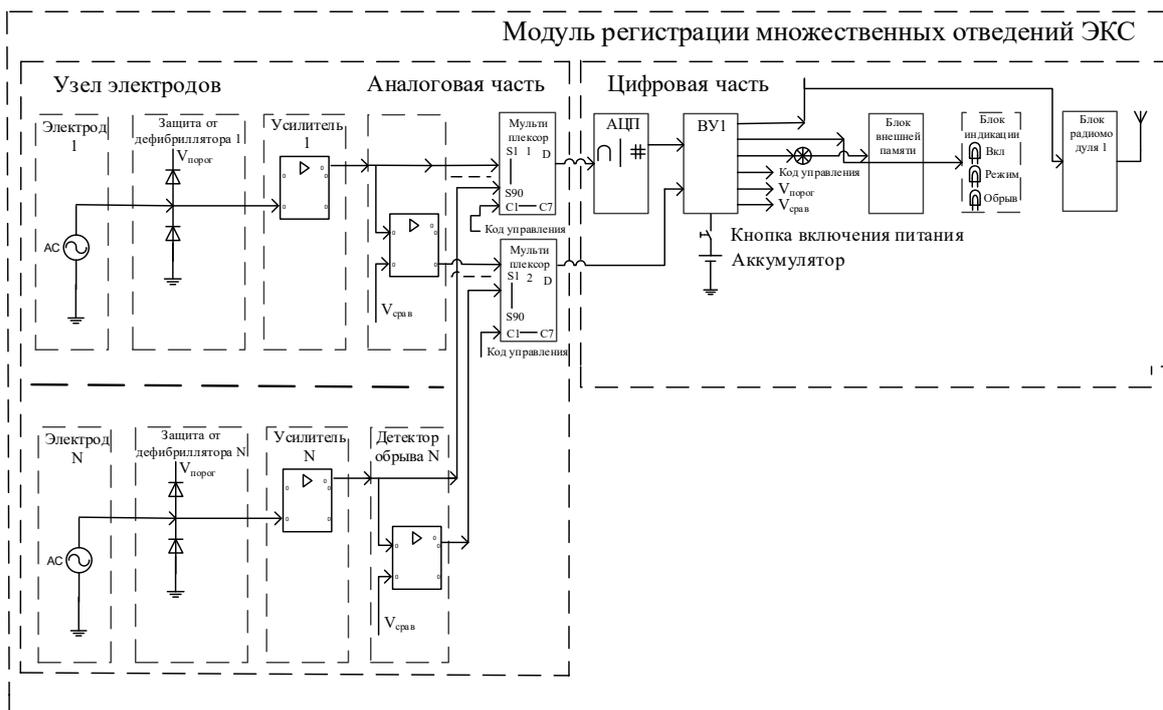


Рис. 1. Структурная схема блока регистрации множественных отведений (МРМО).

Предложенные типы элементов: микроконтроллер – STM32L151; АЦП – ADS1298; MRAM – MR25H40; модуль связи – SIM 868; акселерометр – LIS3DH; Li-Ion зарядник – BQ24070

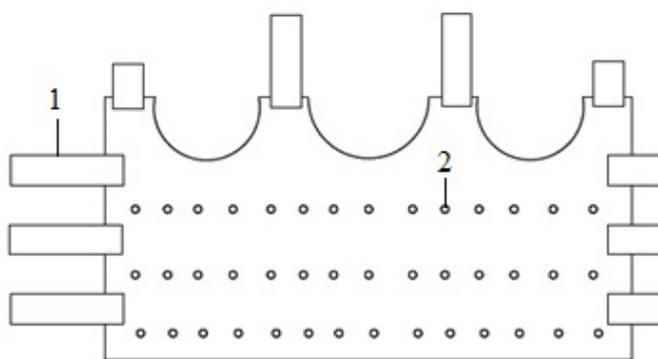


Рис. 2. Плоская развертка жилета:

1 – ремни крепления жилета; 2 – предустановленные электроды

При этом предлагается использовать жилеты нескольких типоразмеров в зависимости от длины периметра торса. Так, жилет размером **Small** надевается при длине периметра торса в поперечном сечении  $l = 70 \div 90$  см, жилет размером **Medium** при  $l = 90 \div 110$  см, жилет размером **Large** при  $l = 110 \div 130$  см с предустановленными электродами (табл. 1) [7].

Таблица 1

Размеры жилета с электродами

Размер жилета с электродами	S		M		L	
	1	2	1	2	1	2
Окружность грудной клетки, см	70–80	80–90	90–100	100–110	110–120	120–130
Высота жилета, см	25					

Блок приема/передачи данных выполнен с возможностью осуществления беспроводной передачи цифрового кода электрокардиосигналов.

Блок внешней памяти выполнен с возможностью записи цифрового кода электрокардио-сигналов; блок питания выполнен с возможностью обеспечения автономным электропитанием.

В рамках рассмотренных материалов и методов перейдем к обсуждению полученных результатов по устранению основных источников помех при регистрации множественных отведений ЭКС.

### *Плохой электрический контакт между кожей и электродами*

Для регистрации ЭКС в множественных отведениях электроды жилета должны прочно фиксироваться на теле человека и в то же время не доставлять дискомфорта. Диагностика состояния сердца пациента начинается с проверки наличия контакта «кожа–электрод». Для определения наличия контакта электродов с кожей предлагается измерять сопротивление этого контакта с помощью измерения амплитуды высокочастотного сигнала, подаваемого на тело через эти электроды. При обрыве электрода сопротивление возрастает, что в свою очередь увеличивает амплитуду сигнала возбуждения.

Для того, чтобы сигнал возбуждения не имел влияния на полезный сигнал ЭКГ, его частоту следует выбирать как можно дальше от граничной частоты, которая обычно составляет 100 Гц. Для разделения сигналов удобно использовать цифровые фильтры.

На рис. 3 показан входящий сигнал при использовании данного метода определения нарушения контакта до и после фильтрации (графики сдвинуты относительно друг друга для лучшей наглядности).

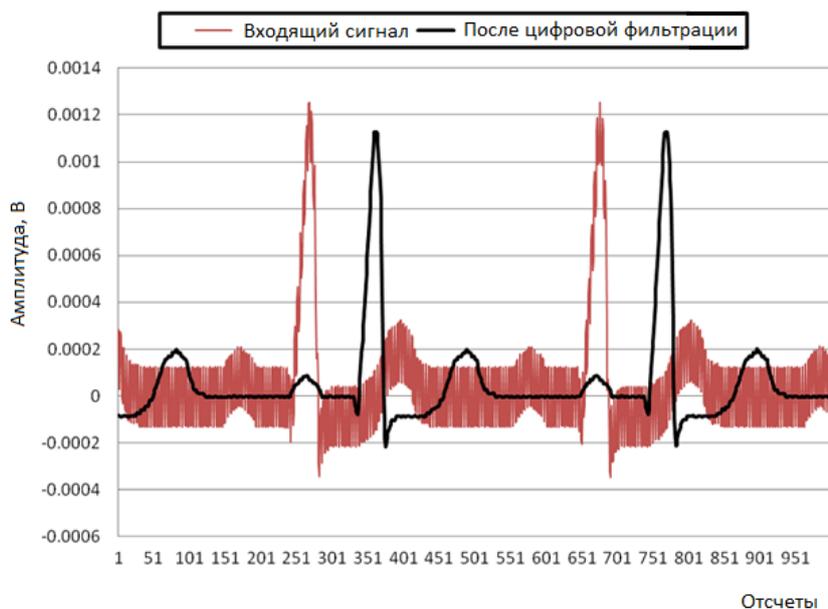
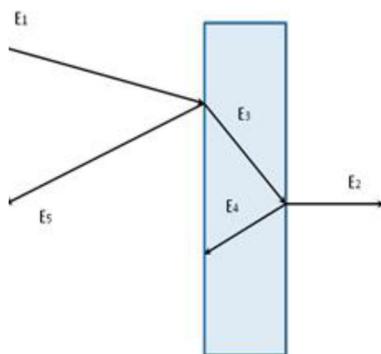


Рис. 3. ЭКС при использовании частотного метода определения нарушения контакта «кожа–электрод»

В предлагаемой системе кардиодиагностики обработка сигналов может происходить непосредственно в момент сбора информации, либо после окончания сбора порции информации. Решение о срабатывании детектора обрыва может выноситься, основываясь как на аппаратной обработке сигналов, так и на цифровом анализе.

### *Индуктивное воздействие*

Основным методом обеспечения электромагнитной совместимости в части устойчивости к воздействию электромагнитным полем, а также соответствию требованиям к уровню излучаемых помех является электромагнитное *экранирование*. В общем случае коэффициент экранирования  $K_e$  – это отношение интенсивности электромагнитного поля, измеренного до установки экрана и после его установки. На рис. 4 приведены формулы для его расчета при измерении напряженности поля в различных величинах.



$E_1$ -падающая волна  
 $E_2$ -прошедшая волна  
 $E_3$ -поглощенная волна  
 $E_4$ -переотраженная волна  
 $E_5$ -отраженная волна

$$E_2 = E_1 - E_3 - E_4 - E_5$$

$$K_3[dB] = 10 \log(P_1/P_2)$$

$$K_3[dB] = 20 \log(E_1/E_2)$$

$$K_3[dB] = 20 \log(H_1/H_2)$$

$$K_3[dB] = P_1[dB] - P_2[dB]$$

Рис. 4. Иллюстрация коэффициента экранирования  $K$ , и формулы для его расчета

От каждой границы раздела сред происходит отражение электромагнитной волны, при этом в толще материала происходит поглощение. На высоких частотах коэффициент экранирования определяется коэффициентом отражения  $E_5$ , который для электромагнитного поля близок к 100 %.

Для создания эффективного экрана необходимо подобрать материал, его структуру и толщину в зависимости от составляющей электромагнитного поля, которую необходимо экранировать.

### Емкостное воздействие

Основываясь на методике расчета электромагнитной совместимости, представленной в работе [8], осуществляется расчет для проводников, расположенных на одной стороне и идущих параллельно (рис. 5).

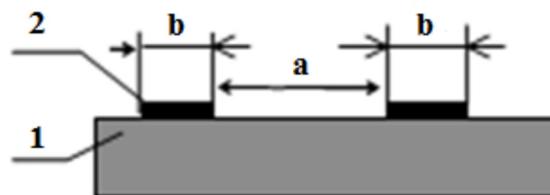


Рис. 5. Схема расположения проводников на жилете:  
1 – жилет; 2 – проводники от электродов

Сопротивление проводника рассчитывается по формуле [6]:

$$R = \rho \frac{l_{con}}{bd} = 0,0175 \frac{50}{0,25 \cdot 35} = 0,1 \text{ Ом}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное объемное электрическое сопротивление проводника, равное  $\rho = 0,0175$  мкОм/м – для медных проводников, полученных химическим методом;  $l_{con}$  – длина проводника, мм;  $b$  – ширина проводника, мм;  $d$  – толщина проводника, мкм.

Рассчитывается допустимый ток в проводнике по формуле [6]:

$$I_{max} = 10^{-3} \gamma_{lim} bd = 10^{-3} \cdot 30 \cdot 0,25 \cdot 35 = 0,26 \text{ мА},$$

где  $\gamma_{lim}$  – допустимая плотность тока,  $\gamma_{lim} = 30$  А/мм<sup>2</sup> для проводников, полученных химическим методом.

Рассчитывается паразитная емкость в выбранном участке жгута, где она наибольшая. Емкость между двумя выбранными проводящими элементами определяется по формуле

$$C = \frac{0,12 \epsilon_r l_{con}}{\lg\left(\frac{2a}{b+d}\right)} = \frac{0,12 \cdot 5 \cdot 20}{\lg\left(\frac{2 \cdot 0,85}{0,25 + 35 \cdot 10^{-3}}\right)} = \frac{12}{0,78} \approx 15 \text{ пФ}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость среды между проводниками, расположенными на наружных поверхностях жгута;  $l_{con}$  – длина участка, на котором проводники параллельны друг другу, мм ( $l_{con} = 50$  мм);  $b$  – ширина проводника, мм ( $b = 0,25$  мм);  $d$  – толщина проводника, мм ( $d = 35$  мкм);  $a$  – толщина диэлектрика, мм ( $a = 0,85$  мм).

Из приведенных расчетов следует, что паразитная емкость имеет достаточно малые значения и можно пренебречь мерами защиты при регистрации множественных отведений электрокардиосигнала от влияния емкостного воздействия.

### Заключение

В результате выполненного исследования авторами получены следующие основные научные результаты:

1. Разработан модуль регистрации электрокардиосигналов множественных отведений, защищенный патентом и использующий жилеты нескольких типоразмеров с предустановленными электродами и позволяющий проводить электрокардиологический скрининг с предоставлением пространственных характеристик электрической активности сердца.

2. Установлено, что основными источниками помех при регистрации множественных отведений ЭКС являются плохой электрический контакт между кожей и электродами, индуктивное и емкостное воздействия.

3. Разработанный алгоритм самодиагностики для определения нарушения контакта «кожа–электрод» включает контроль обрыва контакта электрода и позволяет повысить энергоэффективность системы неинвазивной электрокардиодиагностики.

4. Показано, что основным методом обеспечения электромагнитной совместимости при индуктивном воздействии, а также соответствию требованиям к уровню излучаемых помех является электромагнитное экранирование.

5. На основе расчета паразитной емкости для проводников, расположенных на одной стороне и идущих параллельно, установлено, что значение паразитной емкости имеет достаточно малые значения и можно пренебречь мерами защиты при регистрации множественных отведений электрокардиосигнала от влияния емкостного воздействия.

### Список литературы

1. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи : пер. с англ. / под ред. А. Д. Князева. М. : Сов. радио, 1979. Вып. 3. 464 с.
2. Князев А. Д., Пчелкин В. Ф. Проблемы обеспечения совместной работы радиоэлектронной аппаратуры. М. : Советское радио, 1971. 200 с.
3. Гришко А. К., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Управление электромагнитной устойчивостью радиоэлектронных систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 4. С. 66–75.
4. Бодин О. Н., Кривоногов Л. Ю., Ломтев Е. А. Ожигенов К. А. Помехоустойчивая обработка электрокардиосигналов в системах неинвазивной кардиодиагностики : монография. Алматы : Изд-во ЛЕМ, 2016. 216 с.
5. Крамм М. Н. Анализ влияния выбора количества электродов на карты распределения электрического потенциала на поверхностях торса и квазиэпикарда // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 3. С. 61–68.
6. Крамм М. Н. Биоэлектрические особенности перехода к эквивалентному электрическому генератору сердца для задач неинвазивной электрокардиодиагностики // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 53–59. doi: 10.21685/2307-5538-2021-2-7
7. Патент 2764498 Российская Федерация. Способ и устройство регистрации множественных отведений электрокардиосигнала / Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Крамм М. Н. [и др.]. № 2020122154 ; заявл. 03.07.2020 ; опубл. 17.01.2022, Бюл. № 2.
8. Piskun G. A., Alexeev V. F., Avakov S. M. et al. The Impact of ESD on Microcontrollers / ed. by PhD, associate professor V. F. Alexeev. Minsk : Kolorgrad, 2018. 184 p.

### References

1. White D. *Elektromagnitnaya sovместimost' radioelektronnykh sredstv i neprednamerennye pomexhi: per. s angl. = Electromagnetic compatibility of radio-electronic means and unintended interference: trans. from English.* Moscow: Sov. radio, 1979;(3):464. (In Russ.)
2. Knyazev A.D., Pchelkin V.F. *Problemy obespecheniya sovместnoy raboty radioelektronnoy apparatury = Problems of ensuring the joint operation of radio-electronic equipment.* Moscow: Sovetskoe radio, 1971:200. (In Russ.)
3. Grishko A.K., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. Control of electromagnetic stability of radioelectronic systems based on probabilistic analysis of the dynamics of information conflict. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2016;(4):66–75. (In Russ.)
4. Bodin O.N., Krivonogov L.Yu., Lomtev E.A. Ozhigenov K.A. *Pomekhoustoychivaya obrabotka elektrokardiosignalov v sistemakh neinvaзивnoy kardiodiagnostiki: monografiya = Noise-resistant processing of*

- electrocardiosignals in noninvasive cardi diagnostics systems : monograph.* Almaty: Izd-vo LEM, 2016:216. (In Russ.)
5. Kramm M.N. Analysis of the influence of the choice of the number of electrodes on the distribution maps of the electric potential on the surfaces of the torso and quasi-epicardium. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2019;(3):61–68. (In Russ.)
  6. Kramm M.N. Bioelectric features of the transition to an equivalent electrical generator of the heart for non-invasive electrocardi diagnostics. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(2):53–59. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2021-2-7
  7. Patent 2764498 Russian Federation. *Sposob i ustroystvo registratsii mnozhestvennykh otvedeniy elektrokardiosignala = Method and device for recording multiple leads of an electrocardiosignal.* Bodin O.N., Bodin A. Yu., Kramm M.N. et al. № 2020122154; appl. 03.07.2020; publ. 17.01.2022, Bull. № 2. (In Russ.)
  8. Piskun G.A., Alexeev V.F., Avakov S.M. et al. *The Impact of ESD on Microcontrollers.* Ed. by PhD, associate professor V.F. Alexeev. Minsk: Kolorgrad, 2018. 184 p.

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Александр Сергеевич Батяев

бакалавр,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: batayev81@gmail.com

#### Aleksandr S. Batyaev

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

#### Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры технического управления качеством,  
Пензенский государственный технологический  
университет  
(Россия, г. Пенза, проезда Байдукова/  
ул. Гагарина, 1а/11)  
E-mail: bodin\_o@inbox.ru

#### Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor, professor  
of the sub-department of technical quality management,  
Penza State Technological University  
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,  
Penza, Russia)

#### Чыонг Тхи Лан Нхи

магистр, ассистент кафедры основ радиотехники,  
Национальный исследовательский  
университет "МЭИ"  
(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)  
E-mail: truongthilannhi@gmail.com

#### Truong Thi Lan Nhi

Master degree student, assistant of the sub-department  
of radio engineering fundamentals,  
National Research University «MPEI»,  
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

#### Михаил Николаевич Крамм

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры основ радиотехники,  
Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»  
(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)  
E-mail: KrammMN@mail.ru

#### Mikhail N. Kramm

Doctor of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department  
of radio engineering fundamentals,  
National Research University «MPEI»,  
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

#### Андрей Юрьевич Бодин

аспирант,  
Национальный исследовательский  
университет "МЭИ"  
(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)  
E-mail: Bodin98@mail.ru

#### Andrey Yu. Bodin

Postgraduate student,  
National Research University «MPEI»,  
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 02.02.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 02.03.2023**

**Принята к публикации / Accepted 03.04.2023**

УДК 004.94  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-12

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГООСЕВОЙ ПЛАТФОРМОЙ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИМИТАЦИЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ И ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

А. Д. Иванов<sup>1</sup>, А. Ю. Тычков<sup>2</sup>, Д. С. Чернышов<sup>3</sup>,  
С. Ю. Тверская<sup>4</sup>, Р. В. Золотарев<sup>5</sup>, М. С. Яковлев<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>5,6</sup> Центр экспозиционной медицины, Пенза, Россия

<sup>1</sup> Sailtothe54@gmail.com, <sup>2</sup> tychkov-a@mail.ru, <sup>3</sup> deniska\_1980\_13@mail.ru,  
<sup>4</sup> tverskaya\_sofya@mail.ru, <sup>5</sup> leshiy021178@gmail.com, <sup>6</sup> Iakovlev398@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Целью работы является создание прототипа программного обеспечения для аппаратного управления новой многоосевой платформой для виртуальной реальности с имитацией воздействия внешней среды и обратной связью, обеспечивающей полное погружение пользователя в виртуальную реальность посредством воздействия на сенсорные биологические сигнальные системы (тактильную, вестибулярную, слуховую, зрительную). *Материалы и методы.* В рамках реализации настоящего проекта создан программный продукт для управления многоосевой платформой для виртуальной реальности, обеспечивающий полное погружение пользователя. *Результаты.* Результатом реализации проекта является рабочий прототип системы.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность, симулятор движения, реабилитация

**Для цитирования:** Иванов А. Д., Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Тверская С. Ю., Золотарев Р. В., Яковлев М. С. Интеллектуальная система программного управления многоосевой платформой для виртуальной реальности с имитацией воздействия внешней среды и обратной связью // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 97–103. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-12

## INTELLIGENT SOFTWARE CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-AXIS VIRTUAL REALITY PLATFORM WITH SIMULATED ENVIRONMENTAL IMPACT AND FEEDBACK

A.D. Ivanov<sup>1</sup>, A.Yu. Tychkov<sup>2</sup>, D.S. Chernyshov<sup>3</sup>,  
S.Yu. Tverskaya<sup>4</sup>, R.V. Zolotarev<sup>5</sup>, M.S. Yakovlev<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>5,6</sup> Center for Exposure Medicine, Penza, Russia

<sup>1</sup> Sailtothe54@gmail.com, <sup>2</sup> tychkov-a@mail.ru, <sup>3</sup> deniska\_1980\_13@mail.ru,  
<sup>4</sup> tverskaya\_sofya@mail.ru, <sup>5</sup> leshiy021178@gmail.com, <sup>6</sup> Iakovlev398@gmail.com

**Abstract.** *Background.* The aim of the work is to create a prototype of software for hardware control of a new multi-axis platform for virtual reality with simulated environmental effects and feedback, providing a complete immersion of the user in virtual reality through exposure to sensory biological signaling systems (tactile, vestibular, auditory, visual). *Materials and methods.* As part of the implementation of this project, a software product has been created to control a multi-axis platform for virtual reality, providing full immersion of the user with simulated environmental impact and feedback. *Results.* The result of the project is a working prototype of the system.

**Keywords:** virtual reality, motion simulator, rehabilitation

**For citation:** Ivanov A.D., Tychkov A.Yu., Chernyshov D.S., Tverskaya S.Yu., Zolotarev R.V., Yakovlev M.S. Intelligent software control system for a multi-axis virtual reality platform with simulated environmental impact and feedback. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):97–103. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-12

### *Введение*

Для эффективного лечения и профилактики различных заболеваний современная медицина использует широкий спектр различных технологий, которые продолжают развиваться и доказывать свою эффективность.

За последние несколько лет наблюдается стремительное развитие устройств виртуальной реальности в медицинской сфере. PubMed – один из крупнейших сервисов по поиску медицинских исследований, предлагающий статистику по запросу «VR in medicine». Наблюдается экспоненциальный рост количества научных работ по данной тематике. В 2012 г. количество публикаций составляло 74, в 2019 – 504, а за 2022 г. показатель вырос до 954 научных работ.

Система виртуальной реальности, состоящая из сложной электроники, множества датчиков и подключаемых устройств, позволяет «обмануть» человеческие ощущения, заставить пациента чувствовать то, что не происходит с ним в реальном мире, это открывает широкие возможности по использованию VR в медицине.

### *Анализ предметной области*

Практикующие медицинские работники отмечают эффективность использования технологий VR для снижения восприятия боли после перенесенной травмы или во время выполнения процедур и операций путем погружения пациента в виртуальную реальность. Концентрация на ощущениях в виртуальной реальности позволяет организму в меньшей степени реагировать на болевые раздражители реального мира [1]. Данная технология получила название виртуально-реальный гипноз (VRH – virtual reality hypnosis).

С помощью виртуальной реальности появляется возможность лечить психосоматические фантомные боли в конечностях. Например, человек, страдающий от фантомных болей в руке, погрузившись в виртуальную реальность, может сместить фокус восприятия с болевых ощущений в отсутствующей конечности на ее цифровой прообраз, в результате чего боль либо исчезает, либо становится менее выраженной [2].

Виртуальная реальность также используется для нейрореабилитации. В работе [3] показана эффективность использования виртуальной реальности в лечении пациентов с патологиями ЦНС. Погружение в виртуальную реальность запускает механизмы восстановления нейросвязей, что позволяет бороться с нарушением равновесия, движения конечностей и другими симптомами.

Ученые из Белоруссии в своей статье доказали эффективность использования VR в реабилитации мануальной активности у детей с церебральным параличом [4].

Кроме коррекции болевого синдрома и нейрореабилитации, VR находит свое применение в офтальмологии, психиатрии, психологии и других медицинских направлениях.

Для проведения более эффективных сеансов лечения и реабилитации устройства виртуальной реальности постоянно совершенствуются. Для наилучшего опыта погружения пациента в виртуальную среду недостаточно одного лишь шлема виртуальной реальности, необходимо использовать дополнительное оборудование и подключаемые устройства. Во время погружения в виртуальную реальность на пациента все еще действуют внешние факторы, такие как температура, запахи, гравитация и т.п. В современных VR системах существуют специальные установки, управляющие климатом, который синхронизируется со сценой VR, платформы, позволяющие человеку ходить одновременно и в реальном, и в виртуальном мире. Однако во всей экосистеме устройств виртуальной реальности практически отсутствуют решения, которые позволили бы управлять положением человека в реальном пространстве во время погружения в виртуальные сцены. Наличие такого устройства позволило бы значительно улучшить опыт погружения в виртуальную среду и позволить людям, испытывающим проблемы с опорно-двигательной системой, в полной мере ощутить изменение положения своего тела, движение и ускорение в реальном мире.

Среди существующих технических решений можно выделить некоторые запатентованные устройства, выполняющие схожие функции. Корейский патент [6] демонстрирует устройство, позволяющее кабине с пользователем ориентироваться согласно положению пользователя в виртуальной реальности. Главным недостатком данного устройства является его размер. Кабина с человеком в данном варианте установлена на роботизированном манипуляторе, который

должен быть закреплен на прочной платформе, а силы, действующие в узлах манипулятора, из-за особенностей конструкции достаточно большие, вследствие чего возрастают требования к прочности конструкции, крутящему моменту моторов. Все вышеперечисленное, в свою очередь, значительно повышает цену изделия, удобство использования и мобильность устройства.

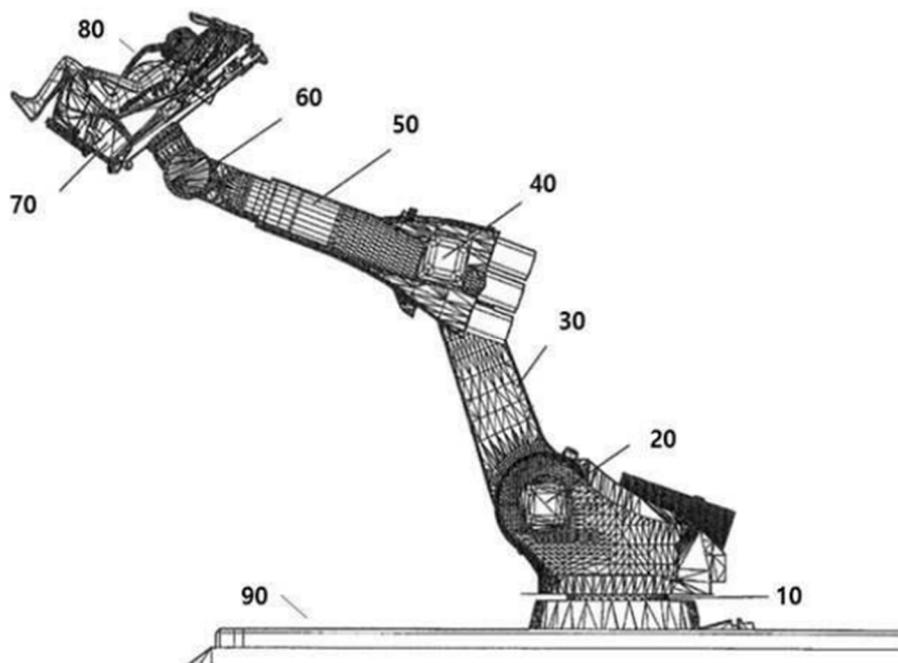


Рис. 1. Внешний вид запатентованного устройства

В патенте Virtual reality motion simulator [7] демонстрируется устройство, представляющее из себя кресло со встроенной механикой, позволяющее ему совершать повороты, согласно данным с VR. Недостатком данного устройства являются ограниченные углы поворота.

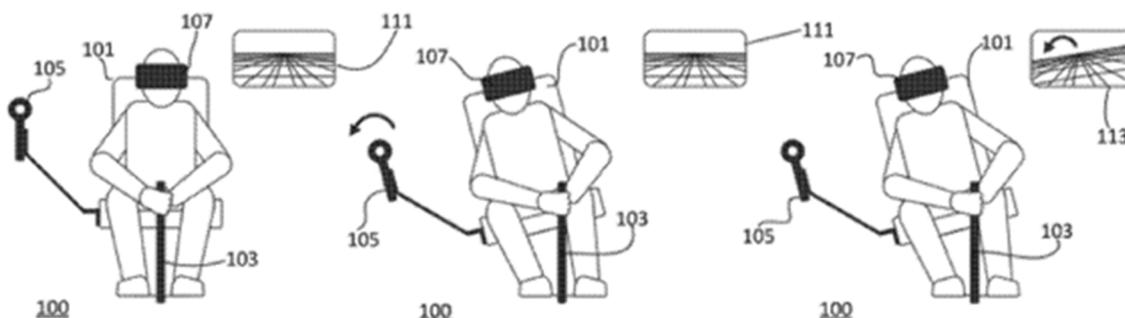


Рис. 2. Внешний вид запатентованного устройства

### *Предлагаемое решение*

Для устранения недостатков указанных технических решений предлагается разработка оригинальной многоосевой платформы для виртуальной реальности с имитацией воздействия внешней среды и обратной связью. Внешний вид предлагаемой платформы представлен на рис. 3. Предлагаемая система состоит из: шаговых двигателей, токосъемников и энкодеров. Наличие трех колец позволяет ориентировать человека в любом направлении. Для приведения колец в движение используются шаговые двигатели. Обладая сравнительно небольшим размером, они имеют достаточно высокий крутящий момент и точное позиционирование. Для получения углового значения каждого из колец используются энкодеры, которые следят за вращением и отправляют соответствующие сигналы на блок управления. Чтобы каждое из колец могло свободно вращаться, используются токосъемники, без которых невозможно проведение проводов к электронным компонентам на внутренних кольцах.

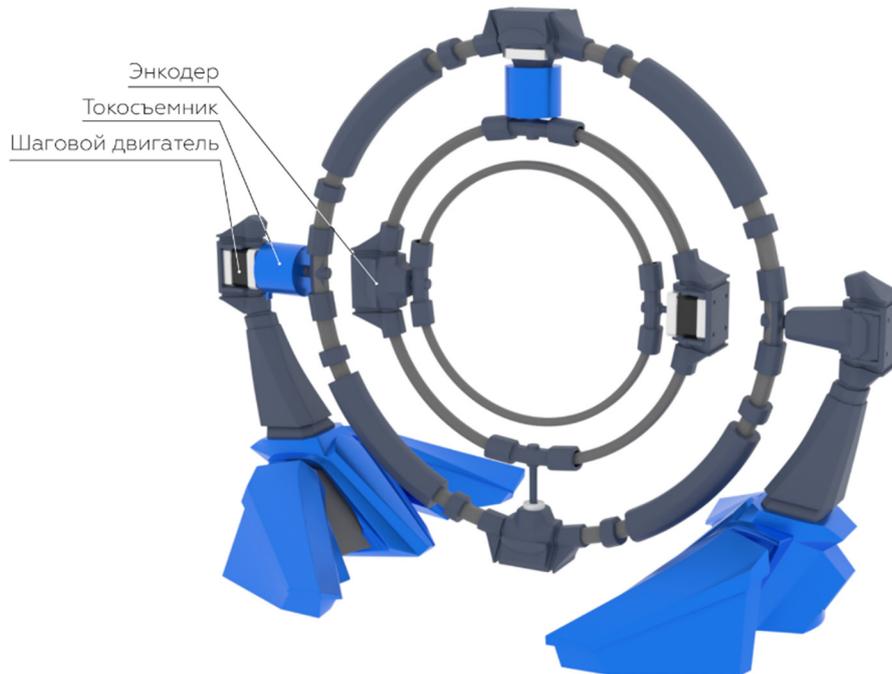


Рис. 3. Внешний вид многоосевой платформы

Суть идеи заключается в следующем (рис. 4). В сцене виртуальной реальности отслеживается положение объекта, в котором находится человек (машина). Положение виртуального объекта синхронизируется с положением человека в реальном пространстве. Например, если человек в виртуальной реальности передвигается на автомобиле, который начинает заезжать в гору, положение одного из колец платформы начнет изменяться, пользователь (находящийся в центре установки), следовательно, ощутит изменение положения своего тела в реальном мире.

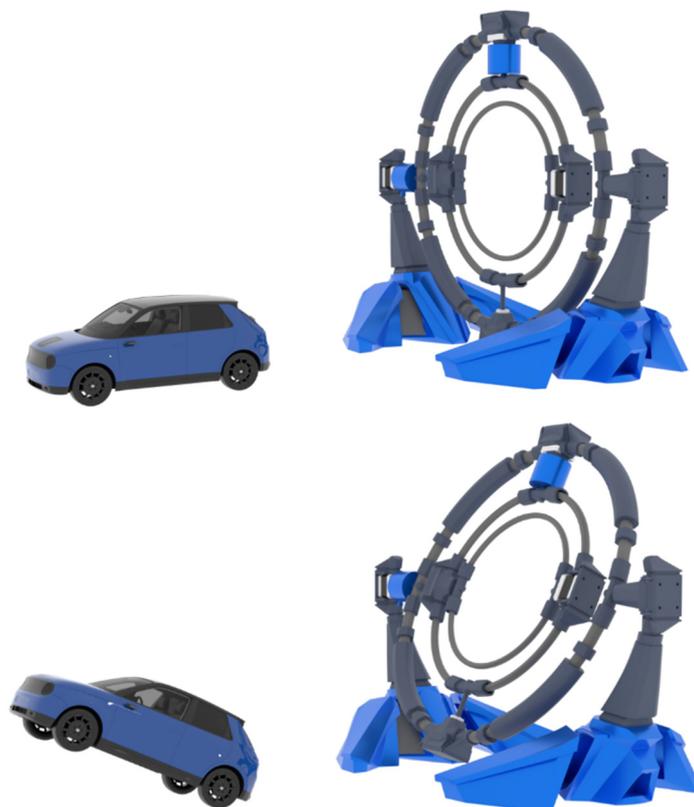


Рис. 4. Принцип работы многоосевой платформы

Обобщенная структурная схема системы управления платформы приведена на рис. 5.



Рис. 5. Обобщенная структурная схема системы управления платформы

Для работы с платформой были созданы сцены виртуальной реальности в Unreal Engine. Данные об угловом положении объекта в пространстве с помощью специально разработанного плагина через локальный порт компьютера отправляются на микроконтроллер в блок управления установкой. Двухъядерный микроконтроллер ESP32, являющийся центром блока управления, обладает достаточным количеством выводов и скоростью работы для поставленных целей. К микроконтроллеру подключаются микросхемы драйвера двигателя A4988, энкодеры, отслеживающие угол поворота колец, управляющий энкодер, LCD экран (рис. 6). Также предусмотрено управление установкой через протокол Bluetooth с помощью смартфона.



Рис. 6. Блок управления макетом

### **Заключение**

В ходе работы будет создана платформа, отвечающая всем вышеуказанным требованиям. Будут исключены недостатки существующих решений, а устройство займет свое место на рынке VR.

### **Список литературы**

1. ONeal B., Patterson D., Soltani M. et al. Virtual reality hypnosis in the treatment of chronic neuropathic pain: a case report // *Int J Clin Exp Hypn.* 2008. Vol. 56. P. 451–462.
2. Бофанова Н. С., Буланов А. А., Яворский А. С., Алехина Е. В. Технология виртуальной реальности как современное направление в реабилитации пациентов с фантомной болью // *Российский журнал боли.* 2021. № 19. С. 33–37.
3. Устинова К. И., Черникова Л. А. Виртуальная реальность в нейрореабилитации // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии.* 2008. № 2. С. 34–39.
4. Шалькевич Л. В. Эффективность использования технологий виртуальной реальности в комплексной реабилитации мануальной активности у детей с детским церебральным параличом // *Журнал Гродненского государственного медицинского университета.* 2020. № 18. С. 716–721.

5. Бурукина И. П., Привалов А. Э. Исследование современных подходов к проектированию цифровых интерфейсов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 78–87. doi: 10.21685/2072-3059-2022-1-7
6. Петруня О. Э. Актуальные проблемы информационного подхода в биомедицине // Биомедицинская радиоэлектроника. 2017. № 10.
7. Пат. KR20180096155A, South Korea, inventors Imjin Guk, Jo Se-hoon. Multi-function multi-equipment virtual Reality Motion simulator and the method.
8. Пат. US10994216B2, United States, inventor David Board. Virtual reality motion simulator.

### References

1. Oneal B., Patterson D., Soltani M. et al. Virtual reality hypnosis in the treatment of chronic neuropathic pain: a case report. *Int J Clin Exp Hypn.* 2008;56:451–462.
2. Bofanova N.S., Bulanov A.A., Yavorskiy A.S., Alekhina E.V. Virtual reality technology as a modern direction in the rehabilitation of patients with phantom pain. *Rossiyskiy zhurnal boli = Russian Journal of Pain.* 2021;(19):33–37. (in Russ.)
3. Ustinova K.I., Chernikova L.A. Virtual reality in neurorehabilitation. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy nevrologii = Annals of clinical and experimental neurology.* 2008;(2):34–39. (In Russ.)
4. Shal'kevich L.V. Efficiency of using virtual reality technologies in complex rehabilitation of manual activity in children with cerebral palsy. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Journal of Grodno State Medical University.* 2020;(18):716–721. (In Russ.)
5. Burukina I.P., Privalov A.E. Research of modern approaches to the design of digital interfaces. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Izvestia of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences.* 2022;(1):78–87. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2022-1-7
6. Petrunya O.E. Actual problems of the information approach in biomedicine. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical radioelectronics.* 2017;(10). (In Russ.)
7. Patent. KR20180096155A, South Korea, inventors Imjin Guk, Jo Se-hoon. *Multi-function multi-equipment virtual Reality Motion simulator and the method.*
8. Patent US10994216B2, United States, inventor David Board. *Virtual reality motion simulator.*

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Александр Дмитриевич Иванов

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
Email: Sailtothe54@Gmail.com

#### Aleksandr D. Ivanov

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

#### Александр Юрьевич Тычков

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tychkov-a@mail.ru

#### Aleksandr Yu. Tychkov

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

#### Денис Сергеевич Чернышов

студент,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: deniska\_1980\_13@mail.ru

#### Denis S. Chernyshov

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

#### Софья Юрьевна Тверская

инженер кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tverskaya\_sofya@mail.ru

#### Sofia Yu. Tverskaya

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

**Руслан Валерьевич Золотарев**

инженер,

Центр экспозиционной медицины

(Россия, г. Пенза, ул. Кронштадская, 2)

E-mail: leshiy021178@gmail.com

**Ruslan V. Zolotarev**

Engineer,

Center for Exposure Medicine

(2 Kronshtadskaya street, Penza, Russia)

**Михаил Сергеевич Яковлев**

лаборант,

Центр экспозиционной медицины

(Россия, г. Пенза, ул. Кронштадская, 2)

E-mail: Iakovlev398@gmail.com

**Mihail S. Yakovlev**

Laboratory assistant,

Center for Exposure Medicine

(2 Kronshtadskaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 27.02.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 27.03.2023**

**Принята к публикации/Accepted 26.04.2023**

## ОБЗОР МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ФИБРОЗА МИОКАРДА

**Н. А. Сержантова**

Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия  
itmmbspgta@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Фиброз миокарда является глобальной проблемой здравоохранения, поскольку он связан почти со всеми формами сердечно-сосудистых заболеваний. Своевременное выявление фиброза миокарда является актуальной задачей, способствующей улучшению качества жизни пациентов с социально значимыми заболеваниями. Целью статьи является систематизация методов диагностики фиброза миокарда. *Материалы и методы.* Обзор выполнен на основе аналитического исследования методов в диагностике фиброза при инфаркте миокарда, ишемической болезни сердца, гипертонической болезни сердца, кардиомиопатиях, аритмиях, фибрилляции предсердий. Анализ методов диагностики фиброза включал выявление измеряемой величины, используемой для оценки типа и локализации фиброза, решающего правила, позволяющего оценить наличие и масштабы поражения миокарда, особенности и ограничения методов, а также оценку критериев эффективности (чувствительность, специфичность). *Результаты.* Представлена систематизация методов диагностики фиброза, таких как метод эндомикардиальной биопсии, коронарной ангиографии, магнитно-резонансной томографии с контрастом, мультиспиральной компьютерной томографии, перфузионной сцинтиграфии, биомаркеров, эхокардиографии и электрокардиографии. В рамках компьютерной диагностической системы «Кардиовид» разработан алгоритм диагностики фиброза миокарда. *Выводы.* Проведенный обзор и представленная систематизация позволяют объективно оценить возможности существующих методов диагностики фиброза миокарда. Для скрининга фиброза крайне необходимо развитие малоинвазивных или неинвазивных методов диагностики для повышения их чувствительности и специфичности.

**Ключевые слова:** фиброз, миокард, сердечно-сосудистые заболевания, методы диагностики, обзор, анализ, систематизация

**Для цитирования:** Сержантова Н. А. Обзор методов диагностики фиброза миокарда // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 104–115. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-13

## DIAGNOSTIC METHODS FOR MYOCARDIAL FIBROSIS

**N.A. Serzhantova**

Penza State Technological University, Penza, Russia  
itmmbspgta@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* Myocardial fibrosis is a global public health problem because it is associated with almost all forms of cardiovascular diseases. Timely detection of myocardial fibrosis is an urgent task contributing to improving the quality of patients' life with socially significant diseases. The aim of the article is to systematize the methods of myocardial fibrosis diagnostics. *Materials and methods.* The review is performed on the basis of the analytical study methods in the diagnosis of fibrosis in myocardial infarction, coronary heart disease, hypertensive heart disease, cardiomyopathies, arrhythmias, atrial fibrillation. Analysis of fibrosis diagnostic methods included identification of the measurable value used to assess the type and localization of fibrosis, the decisive rule to assess the presence and extent of myocardial lesion, the features and limitations of the methods, as well as the evaluation of performance criteria (sensitivity, specificity). *Results.* The systematization of methods for fibrosis diagnostics, such as endomyocardial biopsy, coronary angiography, magnetic resonance imaging with contrast, multispiral computed tomography, perfusion scintigraphy, biomarkers, echocardiography and electrocardiography is presented. An algorithm for diagnosing myocardial fibrosis has been developed within the framework of the computer diagnostic system "Cardiovid". *Conclusions.* The performed review and the presented review, analysis, systematization allow to evaluate objectively the possibilities of the existing methods of diagnostics myocardial fibrosis. The development of minimally invasive or noninvasive diagnostic methods to improve their sensitivity and specificity is essential for fibrosis screening.

**Keywords:** fibrosis, myocardium, cardiovascular diseases, diagnostic methods, review, analysis, systematization

**For citation:** Serzhantova N.A. Diagnostic methods for myocardial fibrosis. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):104–115. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-13

### Введение

В течение последних четырех десятилетий сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) были и остаются основной причиной общей смертности как в России, так и во всем мире. С 2020 г. большая смертность от болезней системы кровообращения (БСК) и ССЗ выросла на 58,9 % [1]. В основе большинства ССЗ, включая ишемическую болезнь сердца (ИБС), лежат структурные изменения в стенках миокарда и сосудов, ключевым компонентом которых является фиброз.

Фиброз – это разрастание соединительной ткани, сопровождающееся образованием рубцов в различных органах. Фиброзное замещение тканей приводит к постепенной потере определенных функций пораженных органов. Фиброз миокарда характеризуется превышением синтеза коллагена I и III типа над его распадом, что приводит к избытку коллагеновых волокон [2].

Фиброз миокарда является глобальной проблемой здравоохранения, поскольку он связан почти со всеми формами ССЗ [3]. Количественными и качественными характеристиками фиброза миокарда являются снижение эластических свойств миокарда, развитие диастолической дисфункции, ухудшение сократительной способности, формирование систолической дисфункции, развитие нарушений сердечного ритма и ухудшение коронарного кровотока у пациентов с сердечной недостаточностью (СН) [2]. Миокардиальный фиброз встречается у пациентов с кардиомиопатией, миокардитом, аритмиями, фибрилляцией предсердий. Своевременное выявление фиброза миокарда является актуальной задачей, способствующей улучшению качества жизни пациентов с социально значимыми заболеваниями. Целью статьи является систематизация методов диагностики фиброза миокарда.

### Материалы и методы

Виды фиброза отличаются в зависимости от локализации и типа коллагеновых волокон (рис. 1). Для разных ССЗ могут быть характерны один или несколько видов фиброза.

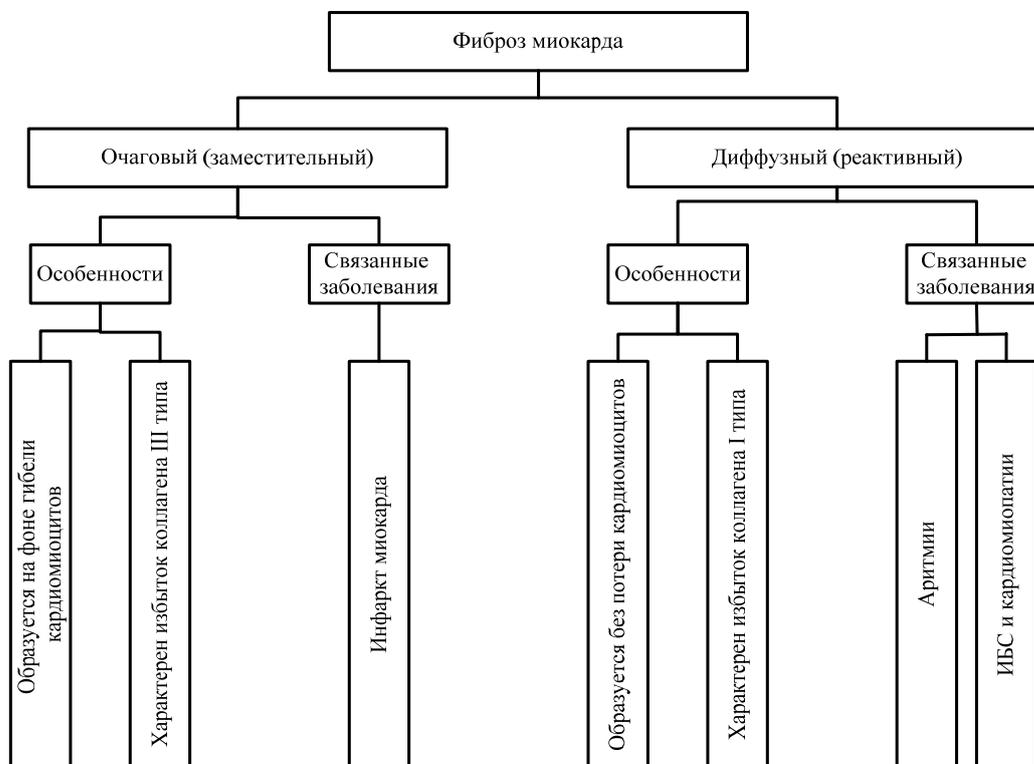


Рис. 1. Виды и особенности фиброза миокарда

В миокарде описывают крупно- и мелкоочаговый, диффузный фиброз, перимускулярный (локализующийся в подкапиллярных пространствах), периваскулярный (локализующийся

вокруг сосудов) кардиосклероз, плексиморфный (с хаотичным расположением коллагеновых волокон) «фиброз-оплетку» [4].

По происхождению различают постинфарктный, атеросклеротический, ангиогенный, постнекротический, миокардитический, кардиосклероз на фоне кардиомиопатий и миокардиодистрофий различного генеза [4].

Наиболее распространенным диагнозом является очаговый фиброз, при котором отмершие клетки сердечной мышцы замещаются рубцовой тканью. Такой тип также называют заместительным фиброзом. Фиброзная ткань характеризуется избытком коллагена III типа – волокон малого диаметра с незначительным количеством поперечных сшивок [2]. Очаговый фиброз возникает при инфаркте миокарда и выполняет репаративную функцию, предотвращая катастрофические механические осложнения, такие как разрыв сердца [5].

Диффузный (реактивный) фиброз обычно не сопровождается значительной потерей кардиомиоцитов. Фиброзная ткань характеризуется избытком коллагена типа I – волокон большого диаметра со значительным количеством поперечных сшивок [2]. Диффузный фиброз может возникать при ИБС, гипертрофической кардиомиопатии (ГКМП), дилатационной кардиомиопатии, аритмогенной дисплазии правого желудочка, миокардите, саркоидозе и после инфаркта миокарда [6].

Для ранней диагностики ССЗ и предотвращения осложнений перечисленных заболеваний крайне важно выявлять тип и локализацию фиброза миокарда, используя при этом эффективные методы диагностики.

Проведенный обзор известных методов диагностики фиброза миокарда [1–26] и собственные исследования выявили, что методы можно разделить на группы по степени инвазивности. Систематизация выполнялась для следующих методов диагностики:

- эндомикардиальной биопсии (ЭМБ);
- коронарной ангиографии;
- магнитно-резонансной томографии (МРТ) сердца с контрастом;
- многослойной компьютерной томографии сердца (МСКТ);
- перфузионной сцинтиграфии миокарда;
- биомаркеров;
- эхокардиографии (ЭхоКГ),
- электрокардиографию (ЭКГ).

Рассмотрим подробнее методы диагностики.

**Эндомикардиальная биопсия.** «Золотым стандартом» качественной и количественной оценки фиброза миокарда является гистологическое исследование (биопсия). ЭМБ – это забор и маркировка шести-десяти фрагментов миокарда [7]. Биопробы позволяют определить объемную фракцию коллагена I и III типа (ОФК) и оценить их соотношение [2, 8]. Однако при сборе материала могут возникать ошибки из-за неравномерного распределения коллагена в миокарде, что может ограничить диагностическую ценность этой процедуры [2].

**Коронарная ангиография.** Коронарная ангиография – это метод рентгенографической визуализации коронарных сосудов после введения контрастирующего вещества. Коронарная ангиография является наиболее точным и надежным способом диагностики заболевания коронарных артерий и определения методов лечения пациентов в различных ситуациях. Процедура является инвазивной, предполагает оперативное вмешательство для введения специального катетера и применяется как для диагностики, так и для контроля состояния сосудов после проведения процедуры. Цель коронарной ангиографии – определить анатомию коронарных артерий и степень их закупорки. Однако этот метод не может точно диагностировать этиологию поражения или выявить патологические изменения, которые не приводят к обструкции просвета сосуда. Несмотря на недостатки, коронарная ангиография является единственным доступным методом, позволяющим получить подробную информацию об анатомии всего коронарного русла [9–11].

**МРТ с контрастом.** В качестве альтернативы эндомикардиальной биопсии используются неинвазивные и малоинвазивные методы диагностики. Наиболее распространенным методом является МРТ сердца с контрастом [12]. В качестве контрастного вещества для МРТ сердца обычно используется гадолиний, поскольку его производные не способны проникать через клеточную мембрану миокарда и накапливаются в межклеточном пространстве [13]. Эти участки визуально становятся более яркими по сравнению со здоровым миокардом [6]. В каждом слое МРТ-изображения все пиксели группируются по значению интенсивности сигнала

относительно среднего значения интенсивности. Каждая группа пикселей выше средней интенсивности в каждом слое разделяется на кластеры, для каждого из которых определяется константа  $K_2$  как отношение средней интенсивности пикселей кластера к средней интенсивности полости предсердий.

Значение  $K_2$  оценивается в сравнении с пороговым значением  $K_1$ . Критерий, позволяющий отличить здоровый миокард от измененного, составляет 1,258 [14].

Для оценки объемной доли коллагена внеклеточный объем определяется путем объединения пиксельных карт  $T_1$  (пикселей с высоким значением интенсивности сигнала) до и после контрастирования с поправкой на уровень гематокрита.

Однако ни карты  $T_1$ , ни определение внеклеточного объема не позволяют напрямую определить характеристики фиброзной ткани, такие, например, как степень сшивки [3].

**Мультиспиральная компьютерная томография.** В настоящее время проведение магнитно-резонансной томографии противопоказано пациентам с имплантированными электронными устройствами. Вместе с тем такие устройства широко используются пациентами с миокардитом. Для таких пациентов особый интерес представляет использование другого современного метода визуализации, а именно МСКТ. Кроме того, в отличие от МРТ, этот метод может быть использован для одновременной оценки состояния коронарных артерий [15]. Ограничения в использовании этого метода диагностики связаны с необходимостью ожидания результатов в течение 48 ч и относительно высокой дозой облучения [13].

**Перфузионная сцинтиграфия.** Перфузионная сцинтиграфия миокарда с использованием таллия-201, технеция-99 и галлия-67 – еще один метод, в котором используются контрастные вещества [13]. Этот метод основан на карте энергетического распада фотонов, полученной от линейного источника излучения. Если в исследуемой области имеется фиброзная ткань, то накопление показателей перфузии низкое. Тяжесть повреждения перфузии миокарда определяется площадью и выраженностью дефекта перфузии по отношению к условно интактному миокарду. Тяжесть дефекта перфузии определяется путем сравнения полученных результатов с базой данных нормальных значений, оцениваемых по 5-балльной шкале: 0 – норма, 1 – предполагаемая гипоперфузия, 2 – умеренная гипоперфузия, 3 – явная гипоперфузия и 4 – отсутствие перфузии. Согласно этой системе состояние перфузии миокарда каждого сегмента оценивается в контексте состояния покоя и стресс-тестов. Этот метод оценки известен как полуколичественный анализ. Интегральный индекс нарушения перфузии является общим показателем тяжести и степени заболевания коронарного кровообращения. Значение интегрального индекса более 12 указывает на высокий риск тяжелых нарушений перфузии миокарда и коронарных осложнений [16].

К недостаткам перфузионного сканирования относят высокую стоимость и длительность процедуры; трудности и ошибки в интерпретации данных, особенно при наличии изменений в межжелудочковой перегородке; снижение чувствительности метода при наличии множественных коронарных поражений и низкое качество исследования у пациентов с ожирением, большой грудью и другими особенностями [17].

**Биомаркеры.** В последние годы растет интерес к биомаркерам, основанным на измерении активности сывороточных пептидов, производных синтеза тканевого фибриллярного коллагена и систем матричных металлопротеиназ и их ингибиторов. Такие биомаркеры широко используются в клинической практике для оценки тяжести фиброзных изменений миокарда [18]. Оценка сывороточных маркеров метаболизма коллагена (например, трансформирующий фактор роста  $\beta_1$  (ТФР- $\beta_1$ ), галектин-3 и т.д.) является одним из самых простых методов выявления фиброза миокарда [3]. Исследования сывороточных маркеров малоинвазивны, кроме того, их можно проводить на протяжении всего периода обследования и лечения [19, 20]. К сожалению, специфичность таких методов очень низкая [20]. Связь между биомаркерами и гистологическим подтверждением фиброза миокарда в большинстве случаев отсутствует или не имеет убедительных доказательств [2].

К неинвазивным методам определения фиброза относят ЭхоКГ, ЭКГ и их сочетание.

**Эхокардиография.** Исследование структуры миокарда с помощью ЭхоКГ основано на физических характеристиках ультразвукового сигнала, отраженного от миокарда: участки с большим количеством соединительной ткани более эхогенны, а ишемизированные участки – менее эхогенны [19].

ЭхоКГ позволяет выявить фиброзные изменения путем анализа диапазона распределения плотности миокарда, для которой установлена тесная корреляция с объемной концентрацией фракции коллагена. Однако диагностическая ценность этого метода нуждается в дальнейшем уточнении; его результаты весьма условны и очень тесно зависят от субъективных факторов. Косвенно о выраженности фиброзных изменений можно судить на основании анализа диастолической функции левого желудочка и увеличения объема левого предсердия [18, 21]. Расширением возможностей ЭхоКГ в диагностике фиброза миокарда является ультразвуковая денситометрия.

**Ультразвуковая денситометрия.** Ультразвуковая денситометрия миокарда (эходенситометрия) позволяет определить плотность миокарда и сделать вывод о наличии отека и фиброза в миокарде. Эходенситометрия требует строгого соблюдения стандартной методики проведения процедуры от настройки оборудования до интерпретации результата исследования. Диапазон плотностей исследуемых тканей сердца должен полностью перекрываться диапазоном ступеней яркости «серой шкалы» прибора. Участки, определяющие стандарты минимальной и максимальной плотностей, должны присутствовать на изображении одновременно с изучаемой зоной.

При определении эхоплотности миокарда следует учитывать фазы сердечного цикла (конец систолы и конец диастолы). Абсолютные показатели эхоплотности миокарда в систолу и диастолу суммируются отдельно для определения среднего значения, а затем рассчитывается систоло-диастолическое отношение (СДС) плотности миокарда в систолу и диастолу. Нормальные значения эхоплотности миокарда составляют 9–12 единиц (в среднем  $11 \pm 2$  единицы), увеличиваясь до 15–20 единиц (в среднем  $17 \pm 2$  единицы) при наличии фиброза [22].

Ограничением данного исследования является отсутствие морфологической верификации степени фиброза [19].

**Комплексное использование методов эхокардиографии и электрокардиографии.** Известен опыт совместного использования методов ЭКГ и ЭхоКГ [23], применяемый для оценки фиброзных изменений левого желудочка. Методом ЭхоКГ оценивается масса миокарда левого желудочка (ММЛЖ, г) и степень гипертрофии миокарда. Общий QRS (мм) рассчитывается как общая амплитуда R-волны в 12 отведениях ЭКГ. Эти значения используются для определения объемной доли интерстициального коллагена (ОФИК):

$$\text{ОФИК} = (1 - 1,3 \cdot \text{общий QRS} \cdot \text{рост} / \text{ММЛЖ}) \cdot 100,$$

где ОФИК – объемная фракция интерстициального коллагена, %; ММЛЖ – масса миокарда левого желудочка, г; общий QRS – сумма амплитуд R-волн в 12 отведениях ЭКГ, мм; рост пациента, м.

По данным литературы, нормальная ОФИК составляет 2–6 % [23]. Увеличение ОФИК указывает на наличие фиброза.

**Электрокардиография.** В настоящее время наиболее распространенным методом исследования у пациентов с заболеваниями сердца является ЭКГ. Признаки фиброза миокарда на ЭКГ характеризуются замедленным увеличением амплитуды R-зубца или аномалиями Q-зубца. Чаще всего эти признаки недостаточно информативны: чувствительность для выявления постинфарктного рубца миокарда составляет 48,8–66 %, специфичность – 75–85 % [24].

Ряд исследований [24, 25] связывает появление фрагментированных комплексов QRS (*fQRS*) на ЭКГ в 12 отведениях с фиброзом миокарда. Так, *fQRS* представляет собой задержку проводимости, вызванную рубцом миокарда у пациентов с ИБС. Кроме того, *fQRS* встречается при других заболеваниях миокарда, таких как кардиомиопатия и врожденный порок сердца. *fQRS* связан с повышенной смертностью и аритмическими событиями у пациентов с ИБС. *fQRS* также был определен как маркер аритмогенной правожелудочковой дисплазии/кардиомиопатии и синдрома Бругада [25]. При всех этих заболеваниях выявляется фиброз миокарда. Критерием наличия фиброза является появление *fQRS* в более чем двух смежных передних отведениях [25]. Фрагментацией в узких комплексах считается наличие двух и более зазубрин на зубцах R или S, а в широких (>120 мс) – наличие двух зазубрин, расстояние между которыми превышает 40 мс или наличие трех и более зазубрин на зубцах R или S как минимум в двух смежных отведениях [24].

При возникновении фиброза происходит нарушение структуры миокарда, а следовательно, и нарушение проведения электрического импульса (замедление, «зигзагообразное» проведение), что на ЭКГ отражается в виде изменений процессов деполяризации. Помимо *fQRS* на

ЭКГ обнаруживается фрагментация желудочкового эктопического комплекса (ЖЭК), феномен ранней реполяризации желудочков (ФРРЖ), изменяется ширина желудочкового эктопического комплекса (ЖЭК). Эти диагностические критерии являются наиболее перспективными для выявления структурных изменений миокарда, в частности, фиброза с помощью ЭКГ [26].

### Результаты

В результате проведенного обзора и анализа современные методы диагностики фиброза миокарда были разделены на три группы: инвазивные, малоинвазивные и неинвазивные (рис. 2).

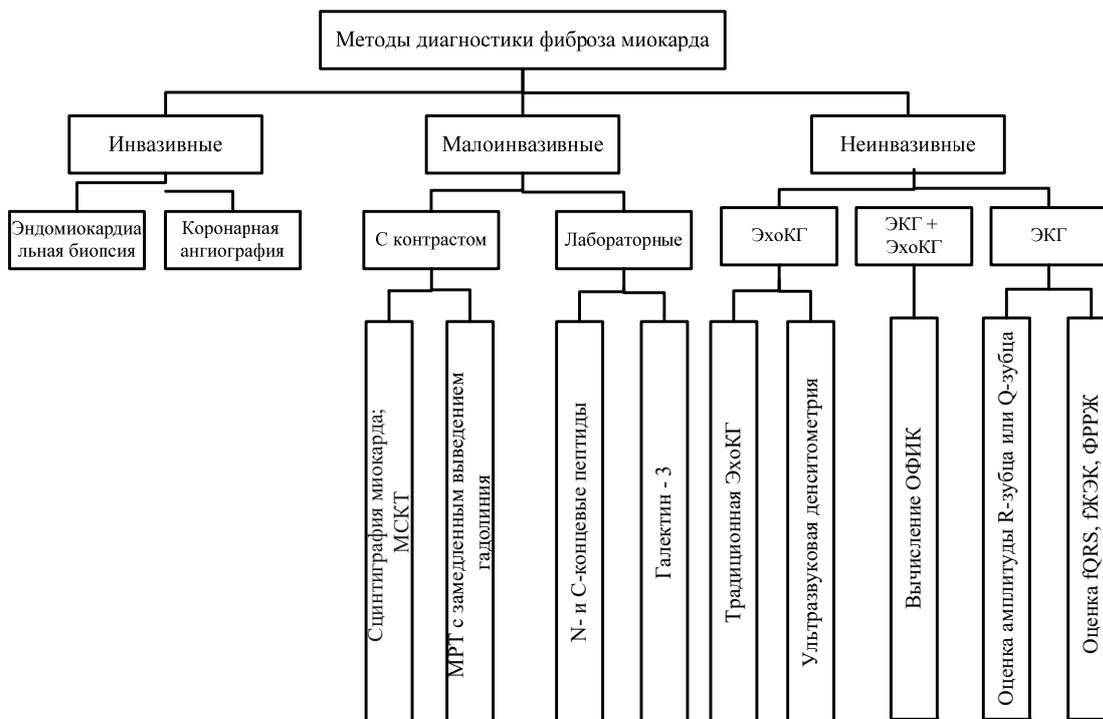


Рис. 2. Методы диагностики фиброза миокарда

Анализ методов диагностики фиброза включал выявление измеряемой величины, используемой для оценки типа и локализации фиброза, решающего правила, позволяющего оценить наличие и масштабы поражения миокарда, особенности и ограничения методы, а также оценку критериев эффективности (чувствительность, специфичность) диагностики фиброза при инфаркте миокарда, ишемической болезни сердца, гипертонической болезни сердца, кардиомиопатиях, аритмиях, фибрилляции предсердий. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Результаты анализа методов диагностики фиброза

Метод	Измеряемый параметр	Решающее правило	Эффективность	Ограничения
1	2	3	4	5
Эндомикардиальная биопсия (инвазивный метод)	ОФК I и III типа [2]	ОФК > 6 % [8]	Информативность от 53 до 98 %. Диагностическая ценность от 35 до 43 % [7]. Стандарт верификации фиброза, дифференциальная диагностика широкого круга заболеваний	Высокая инвазивность процедуры, высокая вероятность осложнений, небольшое количество биопроб

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
Коронароангиография (инвазивный метод)	Сужение просвета [10]	Сужение просвета >50 % [10]	Стандарт верификации заболеваний сердечно-сосудистого русла	Высокая вероятность осложнений, диагностирует фиброз клапанов сердца
МРТ с замедленным выведением гадолиния (малоинвазивный метод)	Индекс контрастирования, рассчитанный на основе интенсивности сигнала при МРТ	Индекс контрастирования >1,258 [14]	Позволяет определять локализацию фиброза. Чувствительность от 69 до 78 % [13, 14]	Невозможность непосредственно обнаружить характеристики фиброзной ткани
Мультиспиральная компьютерная томография (малоинвазивный метод)	Отсроченное накопление контраста	Наличие характерных типов отсроченного контрастирования	Чувствительность составляет около 60 %, специфичность достигает 50–80 % [15]	Высокая лучевая нагрузка, длительность процедуры
Перфузионная сцинтиграфия миокарда (малоинвазивный метод)	Суммарный индекс дефектов перфузии	Суммарный индекс дефектов перфузии > 12 [16]	Чувствительность составляет около 36 %, специфичность достигает 98 % [13]	Низкое качество исследования у больных с ожирением, с большими молочными железами, при высоком стоянии диафрагмы
Биомаркеры (малоинвазивный метод)	Концентрация биомаркера в плазме венозной крови	Концентрация > 16,9 нг/мл (для галектина-3) [18]	Чувствительность до 70 % [18]	Невозможность определения локализации и обширности поражения миокарда по лабораторным тестам
ЭхоКГ (неинвазивный метод)	Распределение плотности пикселей на гистограмме интенсивности ультразвукового сигнала [18]	Увеличение интенсивности ультразвукового сигнала прямо пропорционально росту гистологического объема коллагена в данной зоне [21]	Чувствительность менее 50 %	Ориентировочная информация, очень тесно зависит от субъективных факторов
Ультразвуковая денситометрия (неинвазивный метод)	СДС, Эхоплотность сердечной стенки	Эхоплотность 15–20 ед. [22]	Чувствительность примерно 50 %	Отсутствие морфологической верификации степени фиброза
ЭКГ+ЭхоКГ (неинвазивный метод)	ОФИК	ОФИК > 6 % [23]	Чувствительность порядка 80 %	Невозможность непосредственного обнаружения характеристики фиброзной ткани; исследуется левый желудочек

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
ЭКГ (неинвазивный метод)	амплитуда $R$ ; форма зубца $Q$ ; $fQRS$ , $fЖЭК$ , ФРРЖ	замедленное нарастание амплитуды $R$ или патологический зубец $Q$ ; $fQRS$ , $fЖЭК$ , ФРРЖ в более чем двух смежных передних отведениях	Чувствительность от 7 до 66 %, специфичность от 20 до 85 % [24, 26]	Невозможность непосредствен- ного обнаружения характеристики фиброзной ткани

Проведенный анализ показал, что неинвазивные и малоинвазивные методы имеют достаточно низкие показатели чувствительности и специфичности и, кроме того, не позволяют верифицировать тип фиброза. Исследование ЭКГ признаков фиброза является наиболее перспективным для определения локализации, характера и типа фиброза, а также вторичной патологии, которой фиброз предшествует.

В компьютерной диагностической системе «Кардиовид» [27] разработан алгоритм диагностики фиброза миокарда, приведенный на рис. 3. Особенностью алгоритма является выявление как очагового, так и диффузионного фиброза миокарда.

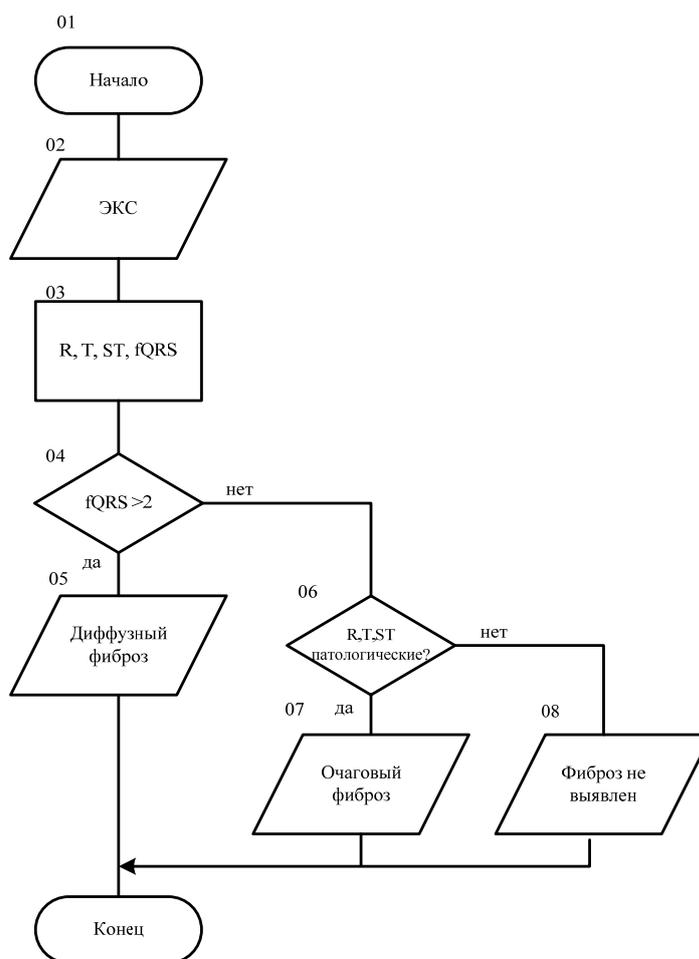


Рис. 3. Алгоритм диагностики фиброза миокарда

Локализация фиброза миокарда подтверждается результатом моделирования распространения волны возбуждения. На рис. 4 приведена иллюстрация процесса огибания волной возбуждения участка диффузионного фиброза миокарда.

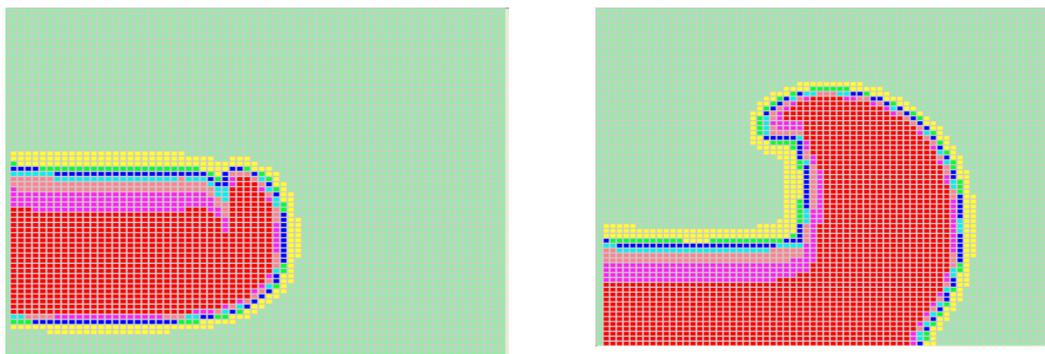


Рис. 4. Огибание волной возбуждения участка диффузионного фиброза миокарда

Предположим, что в момент, когда волна возбуждения огибает область диффузионного фиброза миокарда, последняя выходит из заторможенного состояния (рис. 4). При этом волна возбуждения начинает распространяться внутрь вышедшей из торможения области.

### Заключение

Проведенный обзор и представленная систематизация позволяют объективно оценить возможности существующих методов диагностики фиброза миокарда. В рамках компьютерной диагностической системы «Кардиовид» разработан алгоритм диагностики фиброза миокарда. Для скрининга фиброза крайне необходимо развитие малоинвазивных или неинвазивных методов диагностики, позволяющих повысить их чувствительности и специфичности.

### Список литературы

1. Сон И. М., Стародубов В. И., Маношкина Е. М., Ступак В. С. Тенденции показателей заболеваемости и больничной летальности от болезней системы кровообращения на фоне новой коронавирусной инфекции COVID-19 // Профилактическая медицина. 2021. № 24. С. 7–14.
2. Каретникова В. Н., Кашталап В. В., Косарева С. Н., Барбараш О. Л. Фиброз миокарда: современные аспекты проблемы // Терапевтический архив. 2017. № 1. С. 88–93.
3. Миклишанская С. В., Мазур Н. А., Шестакова Н. В. Механизмы формирования миокардиального фиброза в норме и при некоторых сердечно-сосудистых заболеваниях. Методы его диагностики // Медицинский совет. 2017. № 12. С. 75–81.
4. Митрофанова Л. Б. Виды фиброза и его распространенность в предсердиях при фибрилляции предсердий на фоне ишемической болезни сердца и ревматизма // Вестник аритмологии. 2014. № 75. С. 10–16.
5. Шевченко Ю. Л., Ульбашев Д. С. Иммуобилизирующий интерстициальный фиброз сердца. Часть 1 // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н. И. Пирогова. 2022. № 2. С. 4–10.
6. Карпенко Ю. И. Фиброз миокарда и аритмии: прогнозирование эффекта катетерной абляции // Здоровье Казахстана. 2015. № 6. С. 8–13.
7. Митрофанова Л. Б. Роль эндомиокардиальной биопсии в диагностике воспалительных заболеваний миокарда // Российский кардиологический журнал. 2016. № 1. С. 73–79.
8. Тарасочкина Д. С., Воронина Л. П., Полунина Е. А. [и др.]. Значение показателя объемной фракции интерстициального коллагена при хронической сердечной недостаточности // Астраханский медицинский журнал. 2019. № 1. С. 78–84.
9. Клинический протокол оперативного и диагностического вмешательства. Общие принципы и требования к качеству проведения коронароангиографии. URL: <https://endovascular.kz/images/recomendations/Коронароангиография.pdf>
10. Абдрахманова А. И., Амиров Н. Б., Цибулькин Н. А. [и др.]. Возможности коронароангиографии в диагностике поражения коронарных артерий у пациентов с безболевым ишемией миокарда // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 4.
11. Рекомендации ESC/EACTS 2017 по лечению клапанной болезни сердца. URL: [https://scardio.ru/content/Guidelines/valves\\_7\\_rkj\\_2018.pdf](https://scardio.ru/content/Guidelines/valves_7_rkj_2018.pdf)
12. Григорян С. В., Азарпетян Л. Г., Адамян К. Г. Миокардиальный фиброз и фибрилляция предсердий // Российский кардиологический журнал. 2018. № 9. С. 71–76.
13. Коваленко В. Н., Несукай Е. Г., Чернюк С. В. Роль современных неинвазивных методик визуализации сердца в диагностике миокардита // Український кардіологічний журнал. 2013. № 3. С. 101–109.
14. Пат. РФ 2549825. Способ оценки структурных изменений миокарда предсердий у больных с нарушениями ритма сердца / Стукалова О. В., Апарина О. П., Пархоменко Д. В., Миронова Д. А., Голицын С. П., Терновой С. К. № 2014105347/14 ; заявл. 14.02.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12.

15. Алиева И. Н., Благова О. В., Гагарина Н. В. [и др.]. Возможности мультиспиральной компьютерной томографии в диагностике миокардита и определении прогноза у больных с синдромом дилатационной кардиомиопатии в сопоставлении с биопсией миокарда // Российский кардиологический журнал. 2017. № 2. С. 39–49.
16. Рыжкова Д. В. Перфузионная сцинтиграфия миокарда // Кардиология: Новости. Мнения. Обучение. 2016. № 4. С. 76–86.
17. Тодуров Б. М., Кундин В. Ю., Нобис О. Е. Современные возможности сцинтиграфии миокарда в диагностике поражения миокарда левого желудочка сердца // Украинский кардиологический журнал. 2010. № 5. С. 100–108.
18. Зайцев В. В., Гуршенков А. В., Митрофанова Л. Б. [и др.]. Клиническое значение различных методов оценки миокардиального фиброза при гипертрофической кардиомиопатии // Кардиология. 2020. № 60. С. 44–50.
19. Деева Т. А. Клиническое значение неинвазивных маркеров фиброза у пациентов с метаболическим синдромом : дис. ... канд. мед. наук. М., 2016. 171 с.
20. Пат. РФ 2709193 Способ неинвазивной диагностики фиброза миокарда трансплантированного сердца в отдаленные сроки после трансплантации у реципиентов, перенесших острое отторжение / О. П. Шевченко, А. А. Улыбышева, О. Е. Гичкун, Е. А. Стаханова, Н. П. Можейко, А. О. Шевченко, С. В. Готье ; заявитель и патентообладатель ФГБУ "НМИЦ ТИО им. ак. В. И. Шумакова" Минздрава России. № 2019126987; заявл. 27.08.2019 ; опубл. 17.12.2019, Бюл. № 35.
21. Федорова Н. В., Герман А. И., Коков А. Н. [и др.]. Эхокардиографические корреляты фиброза миокарда у пациентов с инфарктом миокарда и сохранной фракцией выброса левого желудочка // Фундаментальная и клиническая медицина. 2019. № 2. С. 17–27.
22. Коваль В. Т., Волков П. А. Функциональная диагностика воспалительных процессов в миокарде // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 9. С. 102–106.
23. Калинин Т. В., Ларева Н. В., Чистякова М. В. [и др.]. Опыт применения расчета объемной фракции интерстициального коллагена у больных артериальной гипертензией // Сибирское медицинское обозрение. 2021. № 1. С. 90–95.
24. Гордеева М. С., Пармон Е. В., Карлина В. А., Рыжкова Д. В. Фрагментация QRS-комплекса как маркер фиброза миокарда у пациентов с ишемической болезнью сердца // Наука и инновации в медицине. 2022. № 2. С. 95–102.
25. Дас М. К., Дуглас П. З. Фрагментированный QRS: предиктор смертности и внезапной сердечной смерти // Сердечный ритм. 2009. № 6. С. 8–14.
26. Гордеева М. С. Электрокардиографические признаки нарушений процессов деполяризации желудочков, их значение в выявлении структурных изменений миокарда : дис. ... канд. мед. наук. СПб., 2022. 154 с.
27. Бодин О. Н., Баусова З. И., Безбородова О. Е., Убиенных А. Г. Имитационное моделирование многоагентной технологии в компьютерной диагностической системе «Кардиовид» // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 1. С. 78–86.

### References

1. Son I.M., Starodubov V.I., Manoshkina E.M., Stupak V.S. Trends in morbidity and hospital mortality from diseases of the circulatory system against the background of a new coronavirus infection COVID-19. *Profilakticheskaya meditsina = Preventive medicine*. 2021;(24):7–14. (In Russ.)
2. Karetnikova V.N., Kashtalap V.V., Kosareva S.N., Barbarash O.L. Myocardial fibrosis: modern aspects of the problem. *Terapevticheskiy arkhiv = Therapeutic Archive*. 2017;(1):88–93. (In Russ.)
3. Miklishanskaya S.V., Mazur N.A., Shestakova N.V. Mechanisms of formation of myocardial fibrosis in normal and in some cardiovascular diseases. Methods of its diagnosis. *Meditsinskiy sovet = Medical advice*. 2017;(12):75–81. (In Russ.)
4. Mitrofanova L.B. Types of fibrosis and its prevalence in the atria with atrial fibrillation on the background of coronary heart disease and rheumatism. *Vestnik aritmologii = Bulletin of Arrhythmology*. 2014;(75):10–16. (In Russ.)
5. Shevchenko Yu.L., Ul'bashev D.S. Immobilizing interstitial fibrosis of the heart. Part 1. *Vestnik Natsional'nogo mediko-khirurgicheskogo Tsentra im. N.I. Pirogova = Bulletin of the National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov*. 2022;(2):4–10. (in Russ.)
6. Karpenko Yu.I. Myocardial fibrosis and arrhythmias: predicting the effect of catheter ablation. *Zdorov'e Kazakhstan = Health of Kazakhstan*. 2015;(6):8–13. (In Russ.)
7. Mitrofanova L.B. The role of endomyocardial biopsy in the diagnosis of inflammatory myocardial diseases. *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2016;(1):73–79. (In Russ.)

8. Tarasochkina D.S., Voronina L.P., Polunina E.A. et al. The value of the indicator of the volume fraction of interstitial collagen in chronic heart failure. *Astrakhanskiy meditsinskiy zhurnal = Astrakhan Medical Journal*. 2019;(1):78–84. (In Russ.)
9. *Klinicheskiy protokol operativnogo i diagnosticheskogo vmeshatel'stva. Obshchie printsipy i trebovaniya k kachestvu provedeniya koronaroangiografii = Clinical protocol of surgical and diagnostic intervention. General principles and requirements for the quality of coronary angiography*. (In Russ.). Available at: <https://endovascular.kz/images/recomendations/Koronaroangiografiya.pdf>
10. Abdрахманова А.И., Амиров Н.Б., Тсйбул'кин Н.А. et al. Possibilities of coronary angiography in the diagnosis of coronary artery lesions in patients with pain-free myocardial ischemia. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2020;(4). (In Russ.)
11. *Rekomendatsii ESC/EACTS 2017 po lecheniyu klapannoy bolezni serdtsa = ESC/EACTS 2017 recommendations for the treatment of valvular heart disease*. (In Russ.). Available at: [https://scardio.ru/content/Guidelines/valves\\_7\\_rkj\\_2018.pdf](https://scardio.ru/content/Guidelines/valves_7_rkj_2018.pdf)
12. Grigoryan S.V., Azarapetyan L.G., Adamyan K.G. Myocardial fibrosis and atrial fibrillation. *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2018;(9):71–76. (In Russ.)
13. Kovalenko V.N., Nesukay E.G., Chernyuk S.V. The role of modern noninvasive heart imaging techniques in the diagnosis of myocarditis. *Ukrains'kiy kardiologichniy zhurnal = Ukrainian Cardiology Journal*. 2013;(3):101–109. (In Russ.)
14. Patent Russian Federation 2549825. *Sposob otsenki strukturnykh izmeneniy miokarda predserdiy u bol'nykh s narusheniyami ritma serdtsa = A method for assessing structural changes in the atrial myocardium in patients with heart rhythm disorders*. Stukalova O.V., Aparina O.P., Parkhomenko D.V., Mironova D.A., Golitsyn S.P., Ternovoy S.K. № 2014105347/14; appl. 14.02.2014; publ. 27.04.2015, Bull. № 12. (In Russ.)
15. Alieva I.N., Blagova O.V., Gagarina N.V. et al. The possibilities of multispiral computed tomography in the diagnosis of myocarditis and determining the prognosis in patients with dilated cardiomyopathy syndrome in comparison with myocardial biopsy. *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2017;(2):39–49. (In Russ.)
16. Ryzhkova D.V. Perfusion scintigraphy of the myocardium. *Kardiologiya: Novosti. Mneniya. Obuchenie = Cardiology: News. Opinions. Training*. 2016;(4):76–86. (In Russ.)
17. Todurov B.M., Kundin V.Yu., Nobis O.E. Modern possibilities of myocardial scintigraphy in the diagnosis of myocardial lesion of the left ventricle of the heart. *Ukrainskiy kardiologicheskiy zhurnal = Ukrainian Cardiological Journal*. 2010;(5):100–108. (In Russ.)
18. Zaytsev V.V., Gurshchenkov A.V., Mitrofanova L.B. et al. The clinical significance of various methods of assessing myocardial fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy. *Kardiologiya = Cardiology*. 2020;(60):44–50. (In Russ.)
19. Deeva T.A. *Clinical significance of noninvasive markers of fibrosis in patients with metabolic syndrome*. PhD dissertation. Moscow, 2016:171. (In Russ.)
20. Patent Russian Federation 2709193. *Sposob neinvazivnoy diagnostiki fibroza miokarda transplantirovanogo serdtsa v otdalennye sroki posle transplantatsii u retsipientov, perenesshikh ostroe ottorzhenie = A method of noninvasive diagnosis of myocardial fibrosis of a transplanted heart in the long term after transplantation in recipients who have undergone acute rejection*. O.P. Shevchenko, A.A. Ulybysheva, O.E. Gichkun, E.A. Stakhanova, N.P. Mozheyko, A.O. Shevchenko, S.V. Got'e; applicant and patent holder FGBU "NMITs TIO im. ak. V.I. Shumakova" Minzdrava Rossii. № 2019126987; appl. 27.08.2019; publ. 17.12.2019, Bull. № 35. (In Russ.)
21. Fedorova N.V., German A.I., Kokov A.N. et al. Echocardiographic correlates of myocardial fibrosis in patients with myocardial infarction and preserved left ventricular ejection fraction. *Fundamental'naya i klinicheskaya meditsina = Fundamental and clinical medicine*. 2019;(2):17–27. (In Russ.)
22. Koval' V.T., Volkov P.A. Functional diagnostics of inflammatory processes in the myocardium. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFU. Technical sciences*. 2009;(9):102–106. (In Russ.)
23. Kalinkina T.V., Lareva N.V., Chistyakova M.V. et al. The experience of calculating the volume fraction of interstitial collagen in patients with arterial hypertension. *Sibirskoe meditsinskoe obozrenie = Siberian Medical Review*. 2021;(1):90–95. (In Russ.)
24. Gordeeva M.S., Parmon E.V., Karlina V.A., Ryzhkova D.V. Fragmentation of the QRS complex as a marker of myocardial fibrosis in patients with coronary heart disease. *Nauka i innovatsii v meditsine = Science and innovations in medicine*. 2022;(2):95–102. (In Russ.)
25. Das M.K., Duglas P.Z. Fragmented QRS: predictor of mortality and sudden cardiac death. *Serdechnyy ritm = Heart rate*. 2009;(6):8–14. (In Russ.)
26. Gordeeva M.S. *Electrocardiographic signs of ventricular depolarization disorders, their significance in identifying structural changes of the myocardium*. PhD dissertation. Saint Petersburg, 2022:154. (In Russ.)
27. Bodin O.N., Bausova Z.I., Bezborodova O.E., Ubiennykh A.G. Simulation modeling of multi-agent technology in the computer diagnostic system "Cardiovid". *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2019;(1):78–86. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors*

**Наталья Александровна Сержантова**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры биомедицинской инженерии,  
Пензенский государственный технологический  
университет  
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/  
ул. Гагарина, 1а/11)  
E-mail: itmmbspgta@yandex.ru

**Natalia A. Serzhantova**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of biomedical engineering,  
Penza State Technological University  
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,  
Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 02.03.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 02.04.2023**

**Принята к публикации / Accepted 12.05.2023**

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА ПО РЕЧЕВЫМ СИГНАЛАМ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

**А. К. Алимуратов**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
alansapfir@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Повышение достоверности обнаружения и классификации критических эмоциональных состояний в отраслях человеческой деятельности, связанных с риском возникновения техногенных и биогенных аварий становится все более актуальной задачей. Целью исследования является повышение эффективности системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам. Объектом исследования являются структура и программно-аппаратная реализация системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний. Предметом исследования являются средства и технические решения программной и аппаратной реализации. *Материалы и методы.* В рамках исследования использовались методы клиент-серверной программно-аппаратной реализации системы на основе оригинальных программных модулей обработки речевых сигналов и классификации эмоциональных расстройств, а также нескольких аппаратных реализаций серверного устройства. *Результаты.* В статье представлена программно-аппаратная реализация системы обнаружения и классификации критических эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в виде клиент-серверного решения в экстремальных условиях. Оригинальность предложенной концепции заключается в создании кластеров серверных устройств, связанных между собой высокоскоростным каналом. Данный подход к организации клиент-серверного решения системы позволяет повысить производительность, увеличить скорость обработки данных, обеспечить стабильность работы и своевременную выдачу результатов в режиме реального времени. *Выводы.* В соответствии с полученными результатами исследования выявлено, что достоверность разработанной системы для классификации эмоциональных состояний составляет 94,7–95,6 %, для классификации эмоций 93,1–95,6 %. В сравнении с аналогичными продуктами на рынке речевых технологий достоверность разработанной системы в среднем больше на 3,15 и 2,35 % для классификации эмоциональных состояний и эмоций соответственно. В перспективе планируется провести дополнительные исследования быстродействия программно-аппаратной реализации системы обнаружения и классификации критических эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в экстремальных условиях.

**Ключевые слова:** обработка речевых сигналов, эмоциональная речь, обнаружение и классификация эмоциональных состояний человека, клиент-серверное решение

**Для цитирования:** Алимуратов А. К. Программно-аппаратная реализация системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в экстремальных условиях // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 116–128. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-14

## SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF A SYSTEM TO DETECT AND CLASSIFY HUMAN EMOTIONAL STATES FROM SPEECH SIGNALS

**A.K. Alimuradov**

Penza State University, Penza, Russia  
alansapfir@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* To improve the accuracy of detection and classification of emotional states in the areas of human activity associated with the risk of man-made and biogenic accidents has become an urgent task. The aim of the study is to improve the efficiency of a system to detect and classify human emotional states from speech signals. The object of the research is the structure and software and hardware implementation of the system for detecting and classifying

emotional states. The subject of the study is the means and techniques for software and hardware implementation. *Materials and methods.* The client-server methods for hardware and software implementation of the system based on the original software modules for speech signal processing and classifying emotional disorders, as well as several hardware implementations of the server device have been used. *Results.* The article presents hardware and software implementation of a system to detect and classify human emotional states from speech signals based on the client-server architecture. The novelty of the proposed concept is the creation of server clusters interconnected by a high-speed channel. This approach to the organization of the client-server architecture of the system allows increasing productivity and the speed of data processing, ensuring stability and timely delivery of results in real time. *Results and conclusions.* The research results have evidenced the accuracy of the developed system for the classification of emotional states being 94.7–95.6 %, and that for the classification of emotions being 93.1–95.6 %. The accuracy of the developed system is on average 3.15 % and 2.35 % higher for the classification of emotional states and emotions, respectively, as compared with related products on the speech technology market. In the future, it is planned to conduct further research on the performance of hardware and software implementation of the system to detect and classify human emotional states from speech signals.

**Keywords:** speech signal processing, emotional speech, detection and classification of human emotional states, client-server architecture

**For citation:** Alimuradov A.K. Software and hardware implementation of a system to detect and classify human emotional states from speech signals. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):116–128. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-14

### Введение

В настоящее время обнаружение и классификация критических эмоциональных состояний в отраслях человеческой деятельности, связанных с риском возникновения техногенных и биогенных аварий, террористических угроз с серьезными последствиями, становится все более актуальной проблемой. Роль достоверности обнаружения «человеческого фактора» значительно возрастает, если трудовая деятельность сопровождается сложными когнитивными процессами, дефицитом времени и высокой эмоциональной нагрузкой.

На сегодняшний день в области речевой аналитики имеются технологии и продукты, предназначенные для обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в экстремальных условиях. В табл. 1 представлена информация о системах классификации и распознавания эмоциональных состояний/эмоций, получивших широкую практическую популярность. В рамках анализа информации в табл. 1 наибольший интерес представляют методы и способы обработки эмоциональных речевых сигналов, а также программно-аппаратная реализация системы классификации отрицательных, нейтральных и положительных эмоциональных состояний человека. Однако в силу коммерческой тайны производители не предоставляют данную информацию. Информация в табл. 1 не претендует на полноту и демонстрирует многообразие, достоинства и недостатки аналогичных продуктов на рынке речевых технологий. Подробное описание перечисленных выше продуктов можно найти на сайтах производителей [1–6].

В соответствии с результатами сравнительного анализа сделаны следующие выводы:

– существует необходимость совершенствования и разработки новых методов и средств обработки и анализа естественной эмоциональной речи, обеспечивающих повышение достоверности фильтрации, сегментации и определения информативных параметров, релевантных эмоциональным состояниям;

– существует необходимость разработки оригинальной концепции программно-аппаратной реализации системы, позволяющей повысить достоверность и снизить уровень ошибок обнаружения и классификации критических эмоциональных состояний человека по речевым сигналам.

В данной статье представлена программно-аппаратная реализация системы обнаружения и классификации критических эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в виде клиент-серверного решения. Оригинальность предложенной концепции заключается в использовании нескольких аппаратных реализаций серверного устройства – создание кластеров, связанных между собой высокоскоростным каналом. Данный подход к организации клиент-серверного решения системы позволяет повысить производительность, увеличить скорость обработки данных, обеспечить стабильность работы и своевременную выдачу результатов в режиме реального времени в экстремальных условиях.

Таблица 1

Системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам, представленные на рынке речевых технологий

Наименование. Тип доступа	Язык(и)	Виды эмоций / характер выражения эмоций	Достоверность обнаружения и классификации	Функционал/назначение	Производитель / Стоимость	Условия регистрации речевых данных
1	2	3	4	5	6	7
1. Система речевой аналитики «SVQA» [1]. Тип доступа: закрытый, платный	Английский, русский, белорусский	Положительные, отрицательные и нейтральные эмоции / вынужденные эмоции	Не менее 90 %	Оценка качества речи, оценка эмоциональной составляющей речи / Безопасность, бизнес (банковская сфера, контакт-центры)	Частотное предприятие «Речевые системы» <a href="https://svqa.ru">https://svqa.ru</a> Беларусь, г. Минск/ По запросу	Телефонный канал, записанные фонограммы
2. Подсистема автоматической оценки качества «Smart Logger» многоканальной системы регистрации телефонных вызовов и речевых сообщений «НЕЗАБУДКА П» [2]. Тип доступа: закрытый, платный	Английский, русский,	Радость, удивление, грусть, страх, гнев, отвращение / вынужденные и естественные эмоции	Ошибка 1-го рода – не более 10 %, ошибка 2-го рода – не более 5 %	Распознавание речи, идентификация личности по речи, поиск ключевых слов, оценка эмоциональной составляющей речи / Безопасность, бизнес (банковская сфера, контакт-центры)	Группа компаний «Центр речевых технологий» (ЦРТ) (компания ЦРТ, ЦРТ-инновации и SpeechPro) <a href="https://www.speechpro.ru">https://www.speechpro.ru</a> Россия, г. Санкт-Петербург / По запросу	Телефонный канал, записанные фонограммы
3. Профессиональная система диагностики голоса и речи «ling WA VES» [3]. Тип доступа: закрытый, платный	Английский, немецкий, французский, испанский, итальянский	Радость, удивление, грусть, страх, гнев, отвращение / естественные эмоции	–	Речевая и языковая терапия, анализ эмоционального состояния, отоларингология / ЛОР-терапия, терапия для профессиональных певцов и ораторов/медицина	Компания WEVOSYS medical technology GmbH <a href="https://www.wevosys.com">https://www.wevosys.com</a> (Германия, г. Баунах) / По запросу	Специализированное микрофонное оборудование для регистрации речевых сигналов
4. Технология анализа голоса «Sense» [4]. Тип доступа: закрытый, платный	Английский, иврит	Радость, удивление, грусть, страх, гнев, отвращение / вынужденные и естественные эмоции	Не менее 92 %	Оценка качества речи, оценка эмоциональной составляющей речи / Безопасность, бизнес (банковская сфера, контакт-центры)	Компания «NemesYS CO» <a href="https://www.nemesysco.com">https://www.nemesysco.com</a> (Израиль) / По запросу	Телефонный канал, записанные фонограммы

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
5. Технологии для анализа эмоций по голосу «Emprath» / «Web Emprath API» / «SDK Emprath API» / «Beluga Vox» / «Emo Value Generator» [5]. Тип доступа: закрытый, платный	Английский, японский	Положительные, отрицательные и нейтральные эмоции / вынужденные и естественные эмоции	–	Распознавание и генерация речи, анализ и оценка эмоциональной составляющей речи / Бизнес (банковская сфера, контакт-центры)	Компания «Emprath Inc.» <a href="https://www.webemprath.com">https://www.webemprath.com</a> (Япония, г. Токио) / По запросу	Телефонный канал, записанные фонограммы
6. Технологии аналитики речи «SmartSpeech» [6]. Тип доступа: закрытый, платный	Русский	Положительные, отрицательные и нейтральные эмоции / вынужденные и естественные эмоции	Не менее 90 %	Распознавание и генерация речи, анализ и оценка эмоциональной составляющей речи / Бизнес (банковская сфера, контакт-центры)	Компания ПАО «Сбербанк» <a href="https://sberdevices.ru">https://sberdevices.ru</a> Россия, г. Москва / По запросу	Телефонный канал, записанные фонограммы

Данная научная статья подготовлена в рамках проекта № МД-1066.2022.4 «Исследование скрытых паттернов речевых сигналов и разработка способов обнаружения и классификации естественно выраженных психоэмоциональных состояний человека», финансируемого Советом по грантам Президента РФ. Статья является продолжением ранее опубликованных научных работ [7–9].

### ***Технические требования к программно-аппаратной реализации системы***

Программная реализация системы представлена в виде мобильного приложения обнаружения и классификации эмоциональных отрицательных (отвращение, страх, гнев, печаль, удивление), нейтральных (нейтралитет) и положительных (удивление, радость) состояний человека по речевым сигналам в виде клиент-серверного решения.

Система должна состоять из модуля обработки речевых сигналов и анализа информативных параметров; модуля классификации, обученного на информативных параметрах, релевантных отрицательным, положительным и нейтральным эмоциональным состояниям.

Для полноценного функционирования мобильного приложения клиентского устройства системы требуются:

- процессор с тактовой частотой – не менее 1 ГГц;
- объем свободной оперативной памяти – не менее 512 Мб;
- объем свободной памяти на жестком диске – не менее 1 Гб.

Мобильное приложение системы должно обеспечивать обнаружение и классификацию критических эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в режиме реального времени и функционировать в режиме доступа к сети «Интернет».

В целях обеспечения возможности реализации мобильного приложения в виде клиент-серверного решения и организации взаимодействия с несколькими устройствами (клиентами) одновременно требуется выполнение следующих требований:

- поддержка многопоточности у процессора серверного устройства;
- увеличенный объем оперативной памяти клиентского и серверного устройств.

Требование к многопоточности обосновывается тем, что для каждого взаимодействующего устройства необходимо выделять отдельное вычислительное ядро. Увеличенный объем оперативной памяти позволит хранить следующую информацию:

- данные с подключенных клиентских устройств к серверному устройству;
- данные для обеспечения работы системы в реальном времени.

Аппаратная реализация системы представлена в виде серверного устройства, включающего в себя: материнскую (системную) плату, процессор, оперативную память, графический ускоритель, блок питания, систему хранения данных и систему охлаждения.

### ***Программно-аппаратная реализация системы***

На рис. 1 представлена оригинальная структура клиент-серверного решения системы обнаружения и классификации критических эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в экстремальных условиях, включающей в себя:

- подсистему обработки речевых сигналов;
- подсистему обнаружения и классификации эмоциональных состояний;
- подсистему управления взаимодействием процессами системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека.

Клиентское устройство, осуществляющее регистрацию речевых сигналов, представляет собой персональное устройство Laptop/Desktop под управлением операционных систем Windows, Linux или macOS, в том числе мобильное устройство под управлением операционных систем iOS или Android.

Пользователь осуществляет регистрацию речевых данных с помощью мобильного приложения, выполняющего следующие этапы локальной обработки:

- предварительную фильтрацию и сглаживание;

- временную коррекцию (разделение длительных записей на сегменты до 30 с для удобства последующей обработки);
- преобразование стерео- в монозапись (включая понижение частоты дискретизации до 8000 Гц);
- преобразование в единый формат WAVE для хранения (включая изменение количества бит, используемых для передачи/обработки данных в единицу времени до 16 и использование импульсно-кодовой модуляции PCM без сжатия последовательно записанных значений амплитуды звука).

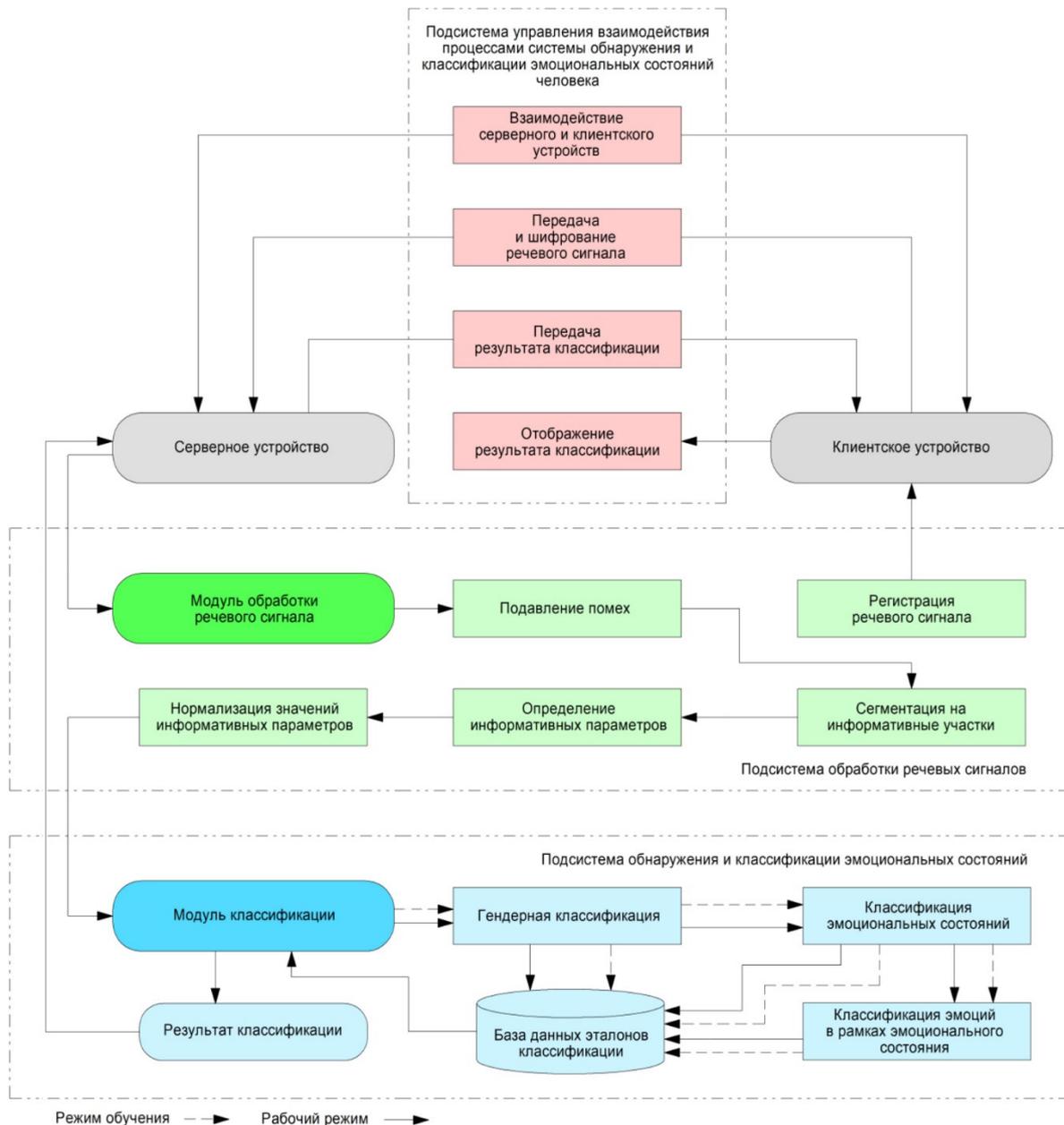


Рис. 1. Структура клиент-серверного решения системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам

Подсистема обработки речевых сигналов разработана на языке программирования C++ и реализует математические модели, требующие необходимых вычислительных мощностей. Программное обеспечение функционирует на серверном устройстве системы, принимает исходный речевой сигнал и выполняет глобальную обработку, включающую в себя:

- подавление помех;
- сегментацию на информативные участки;

- определение информативных параметров;
- нормализацию значений информативных параметров.

Подсистема обработки речевых сигналов обеспечивает подготовку входных данных для подсистемы обнаружения и классификации критических эмоциональных состояний.

Подсистема обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека разработана на языке программирования Python и реализует модели пятислойных нейронных сетей, обеспечивающие:

- гендерную классификацию;
- классификацию эмоциональных состояний;
- классификацию эмоций в рамках эмоциональных состояний.

Для эффективной программной реализации в Python использовались специализированные библиотеки SQLite3: NumPy, Tensorflow, модуль Keras библиотеки Tensorflow и модуль PyPlot библиотеки Matplotlib.

Подсистема управления взаимодействия процессами системы обнаружения и классификации эмоционального состояния человека разработана на языке программирования C++ и реализует:

- передачу речевого сигнала по сетевому протоколу передачи данных TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), представленных в цифровом виде, посредством использования протокола шифрования данных HTTPS (HyperText Transfer Protocol Secure);

- передачу и отображение результат классификации;
- взаимодействие серверного и клиентского устройств.

Для аппаратной реализации системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в виде клиент-серверного решения выбраны и обоснованы следующие аппаратные средства:

- 1) материнская (системная) плата X99 D4X8 (производитель Atermiter) [10];
- 2) процессор XEON E5-2693v3 (производитель Intel) [11];
- 3) оперативная память DDR4 32GB (производитель Samsung) [12];
- 4) графический ускоритель GeForce RTX 3090 Ti (производитель NVIDIA) [13];
- 5) блок питания постоянного тока 2000W PSU 12V (производитель Taifast) [14];
- 6) система охлаждения;
- 7) система хранения данных уровня RAID 0.

### Исследование системы

На рис. 2 представлена методика исследования системы обнаружения и классификации критических эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в экстремальных условиях. Методика включает в себя два этапа: формирование выборки речевых сигналов и непосредственную классификацию эмоциональных состояний и эмоций человека.

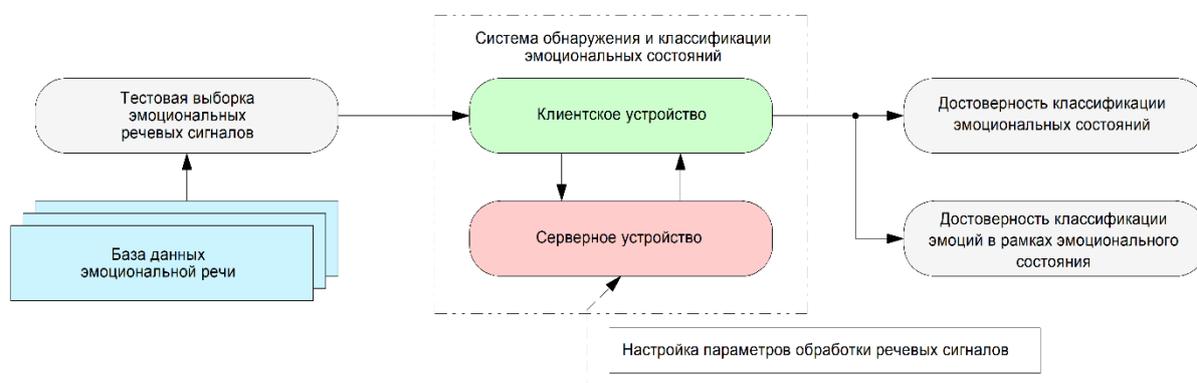


Рис. 2. Структура методики исследования системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам

В рамках исследования предусмотрена возможность настройки параметров обработки речевых сигналов (использование этапов предварительной обработки и подавления помех). Суть

исследования заключается в оценке зависимости достоверности классификации разработанной системы от настройки параметров обработки.

Для оценки достоверности обнаружения и классификации критических отрицательных (страх, отвращение, гнев, печаль, удивление), нейтральных (нейтралитет) и положительных (удивление, радость) эмоциональных состояний человека использовались коэффициенты действительных и мнимых обнаружений, по которым определялись значения ошибок первого и второго рода.

На основе разработанной базы данных для исследования системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека [15, 16] сформирована тестовая выборка эмоциональных речевых сигналов, включающая в себя 100 записей (50 записей – мужчин, 50 записей – женщин) словосочетаний и предложений из многосложных слов длительностью не более 10 с. Тестовая выборка включает в себя сигналы, зарегистрированные в условиях переживания эмоций человеком в реальных жизненных критических отрицательных, нейтральных и положительных эмоциональных состояниях.

В табл. 2–5 представлены усредненные результаты достоверности обнаружения и классификации эмоциональных состояний и эмоций для речевых сигналов тестовой выборки базы эмоциональной речи. В табл. 2 и 3 представлены результаты с использованием этапов предварительной обработки и подавления помех [17–20]. В табл. 4 и 5 представлены результаты без использования данных этапов.

Таблица 2

Достоверность классификации эмоциональных состояний  
с предварительной обработкой и подавлением помех

Результат прогноза	Результат наблюдения		
	Отрицательное	Нейтральное	Положительное
Тестовая выборка базы эмоциональной речи			
Отрицательное	95,6	6,8	3,6
Нейтральное	7,5	94,7	5,8
Положительное	3,2	5,6	95,2

Таблица 3

Достоверность классификации эмоций с предварительной обработкой и подавлением помех

Результат прогноза	Результат наблюдения						
	Страх	Отвращение	Гнев	Печаль	Удивление	Нейтралитет	Радость
Тестовая выборка базы эмоциональной речи							
Страх	93,1	3,1	2,9	3,4	7,7	3,9	1,6
Отвращение	3,2	93,7	4,6	2,7	7,0	5,1	2,4
Гнев	2,7	4,3	95,6	2,4	4,8	1,8	8,2
Печаль	3,5	2,9	2,2	95,4	3,9	5,0	1,8
Удивление	8,1	6,8	4,4	3,8	94,7	6,6	3,7
Нейтралитет	4,1	5,4	1,9	4,5	6,5	95,2	2,4
Радость	1,7	2,1	6,7	1,5	4,6	2,3	95,5

Таблица 4

Достоверность классификации эмоциональных состояний  
без предварительной обработки и подавлением помех

Результат прогноза	Результат наблюдения		
	Отрицательное	Нейтральное	Положительное
Тестовая выборка базы эмоциональной речи			
Отрицательное	92,7	7,1	3,8
Нейтральное	7,9	91,9	6,1
Положительное	3,4	5,9	92,3

Таблица 5

Достоверность классификации эмоций без предварительной обработки и подавлением помех

Результат прогноза	Результат наблюдения						
	Страх	Отвращение	Гнев	Печаль	Удивление	Нейтралитет	Радость
Тестовая выборка базы эмоциональной речи							
Страх	90,3	3,3	3,1	3,6	8,2	4,1	1,7
Отвращение	3,4	90,9	4,9	2,9	7,4	5,4	2,5
Гнев	2,9	4,6	92,7	2,5	5,1	1,9	8,7
Печаль	3,7	3,1	2,3	92,5	4,1	5,3	1,9
Удивление	8,6	7,2	4,7	4,0	91,9	7,0	3,9
Нейтралитет	4,3	5,7	2,0	4,8	6,9	92,3	2,5
Радость	1,8	2,2	7,1	1,6	4,9	2,4	92,6

В табл. 6 представлены значения достоверности обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам разработанной системы в сравнении с аналогами.

Таблица 6

Достоверность обнаружения и классификации  
эмоциональных состояний человека разработанной  
системы в сравнении с аналогами

Наименование	Достоверность обнаружения и классификации
1. Система обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам	94,7 – 95,6 % (для классификации эмоциональных состояний) 93,1 – 95,6 % (для классификации эмоций)
2. Система речевой аналитики «SVQA»	Не менее 90 %
3. Подсистема автоматической оценки качества «Smart Logger» многоканальной системы регистрации телефонных вызовов и речевых сообщений «НЕЗАБУДКА II»	Ошибка 1-го рода – не более 10 % Ошибка 2-го рода – не более 5 %
4. Профессиональная система диагностики голоса и речи «lingWAVES»	–
5. Технология анализа голоса «Sense»	Не менее 92 %
6. Технологии для анализа эмоций по голосу «Empath» / «Web Empath API» / «SDK Empath API» / «Beluga Box» / «Emo Value Generator»	–
7. Технология аналитики речи «SmartSpeech»	Не менее 90 %

*Анализ результатов исследования*

В соответствии с результатами в табл. 2–5 следует, что:

- достоверность классификации эмоциональных состояний и эмоций для речевых сигналов тестовой выборки базы эмоциональной речи составляет от 94,7 до 95,6 % и от 93,1 до 95,6 % соответственно;
- средние значения ошибок первого и второго родов классификации эмоциональных состояний и эмоций для речевых сигналов тестовой выборки базы эмоциональной речи с использованием этапов предварительной обработки и подавления помех в среднем на 3 и 6 % меньше соответственно, чем без использования;
- минимальное значение ошибки первого рода достигается при классификации противоположных отрицательных и положительных эмоциональных состояний 3,2 – 3,6 % и 3,3 – 3,7 % соответственно для речевых сигналов тестовой выборки базы эмоциональной речи;

– максимальное значение ошибки второго рода достигается при классификации эмоций страха и удивления 8,1 – 8,3 %, радости и гнева 8,2 – 8,4 % для речевых сигналов тестовой выборки базы эмоциональной речи;

– наилучшая достоверность классификации для речевых сигналов тестовой выборки базы эмоциональной речи достигается при классификации эмоций гнева, печали и радости 95,6, 95,4 и 95,5 % соответственно; наихудшая достоверность достигается при классификации страха – 93,1 %;

– достоверность обнаружения и классификации разработанной системы в среднем больше на 3,15 % для эмоциональных состояний и на 2,35 % для эмоций в сравнении с наилучшим аналогом – технологией «Sense».

Понижение средней достоверности классификации без использования этапов предварительной обработки и подавлением помех объясняется наличием физиологических шумов в естественной эмоциональной речи, возникающих вследствие нарушения работы органов речевого аппарата под воздействием эмоционального расстройства. Физиологические шумы вносят значительную погрешность, изменяя внутреннюю структуру полезного речевого сигнала.

Высокая достоверность классификации противоположных отрицательных и положительных эмоциональных состояний и эмоций гнева, печали и радости для речевых сигналов тестовой выборки базы эмоциональной речи объясняется высоким уровнем релевантности информативных параметров. Противоположная ситуация при классификации эмоций страха и удивления, радости и гнева – соответствующие информативные параметры имеют низкий уровень релевантности к данным эмоциям.

### *Заключение*

В соответствии с анализом результатов исследования сделаны следующие краткие выводы:

1. Достоверность системы для классификации эмоциональных состояний составляет от 94,7 до 95,6 %, для классификации эмоций – от 93,1 до 95,6 %.

2. Время выполнения классификации составляет не более 30 с, при длительности анализируемой записи – не более 60 с.

3. Достоверность классификации обеспечивается высоким уровнем релевантности набора информативных параметров к эмоциональным состояниям и эмоциям.

4. Использование этапов предварительной обработки и подавления помех для фильтрации физиологических шумов в естественной эмоциональной речи обеспечивает повышение достоверности классификации критических эмоциональных состояний человека по речевым сигналам в экстремальных условиях.

В перспективе планируется провести дополнительные исследования быстродействия программно-аппаратной реализации системы обнаружения и классификации эмоциональных состояний человека по речевым сигналам.

### *Список литературы*

1. Система речевой аналитики «SVQA». URL: <https://svqa.ru> (дата обращения: 20.02.2023).
2. Подсистема автоматической оценки качества «Smart Logger» многоканальной системы регистрации телефонных вызовов и речевых сообщений «НЕЗАБУДКА II». URL: <https://www.speechpro.ru> (дата обращения: 20.02.2023).
3. Профессиональная система диагностики голоса и речи «lingWAVES». URL: <https://www.wevosys.com> (дата обращения: 20.02.2023).
4. Технология анализа голоса «Sense». URL: <https://www.nemesysco.com> (дата обращения: 20.02.2023).
5. Технологии для анализа эмоций по голосу «Empath» / «Web Empath API» / «SDK Empath API» / «Beluga Vox» / «Emo Value Generator». URL: <https://www.webempath.com> (дата обращения: 20.02.2023).
6. Технология аналитики речи «SmartSpeech». URL: <https://sberdevices.ru/smartspeech> (дата обращения: 20.02.2023).

7. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu. Enhancing Estimation Accuracy of Psycho-Emotional State of Operators of Medical Exoskeletons as Intellectual Control Systems with High Degree of Responsibility // 2nd School on Dynamics of Complex Networks and Their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR) (Saratov, Russia, 8–10 Oct., 2018). Saratov, 2018. P. 6–8.
8. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu. Enhancing estimation accuracy of psycho-emotional state of operators of medical exoskeletons as intellectual control systems with high degree of responsibility // Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике : сб. материалов II Междунар. школы-конференции молодых ученых (г. Саратов 8–10 октября 2018 г.). Саратов : Научная книга, 2018. С. 32–35.
9. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Артемов И. И., Куликов М. Ю. Особенности построения систем голосового управления для медицинских экзоскелетов расширенного функционала // Качество. Инновации. Образование. 2016. № S2 (129). С. 66–72.
10. Материнская плата Atermiter X99 D4X8. URL: <https://intel.com> (дата обращения: 20.02.2023).
11. Процессор Intel XEON E5-2693v3. URL: <https://intel.com> (дата обращения: 20.02.2023).
12. Память оперативная Samsung DDR4 32GB. URL: <https://samsung.com> (дата обращения: 20.02.2023).
13. Графический ускоритель NVIDIA GeForce RTX 3090 Ti. URL: <https://nvidia.com> (дата обращения: 20.02.2023).
14. Блок питания постоянного тока Taifast Bitcorn ATX 2000W PSU 12V. URL: <https://taifast.com> (дата обращения: 20.02.2023).
15. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Gorbunov V. N. et al. Development of Natural Emotional Speech Database for Training Automatic Recognition Systems of Stressful Emotions in Human-Robot Interaction // 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR) (Innopolis, Russia, 7–9 Sept., 2020). Innopolis, 2020. P. 11–16.
16. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020621102. Верифицированная база речевых сигналов, релевантно отражающих нарушения речевой функции человека, зарегистрированных в период стрессотравмирующих ситуаций (экстремальных условиях) / А. Ю. Тычков, А. К. Алимуратов, А. В. Агейкин, В. Н. Горбунов, Е. К. Рева, В. А. Межина // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем ; заявл. 12.05.2020 ; опубл. 02.07.2020.
17. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Дудников Д. С. Новый подход сегментации речевых сигналов на основе частотно-временного анализа // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 80–92.
18. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П. [и др.]. Способ обработки речевых сигналов на основе метода декомпозиции на эмпирические моды // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 75–89.
19. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Churakov P. P. et al. Novel EMD-Based Technological Procedure for Speech Signal Processing // 24rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA) (Moscow, Russia, 30 March – 1 April, 2022). Moscow, 2022. 6 p.
20. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Churakov P. P. et al. EMD-Based Method for Windowed Filtering of Speech Signals // 5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA) (Kaliningrad, Russia, 13–15 Sept., 2022). Kaliningrad, 2022. P. 6–9.

### References

1. *Sistema rechevoy analitiki «SVQA» = Speech analytics system "SVQA".* (In Russ.). Available at: <https://svqa.ru> (accessed 20.02.2023).
2. *Podsystema avtomaticheskoy otsenki kachestva «Smart Logger» mnogokanal'noy sistemy registratsii telefonnykh vyzovov i rechevykh soobshcheniy «NEZABUDKA II» = Subsystem of automatic quality assessment "Smart Logger" of the multichannel system of registration of telephone calls and voice messages "FORGET-ME-NOT II".* (In Russ.). Available at: <https://www.speechpro.ru> (accessed 20.02.2023).
3. *Professional'naya sistema diagnostiki golosa i rechi «lingWAVES» = Professional voice and speech diagnostics system "lingWAVES".* (In Russ.). Available at: <https://www.wevosys.com> (accessed 20.02.2023).
4. *Tekhnologiya analiza golosa «Sense» = Voice analysis technology "Sense".* (In Russ.). Available at: <https://www.nemesysco.com> (accessed 20.02.2023).
5. *Tekhnologii dlya analiza emotsiy po golosu «Empath» = Technologies for analyzing emotions by voice "Empath" / «Web Empath API» / «SDK Empath API» / «Beluga Box» / «Emo Value Generator».* Available at: <https://www.webempath.com> (accessed 20.02.2023).
6. *Tekhnologiya analitiki rechi «SmartSpeech» = SmartSpeech speech analytics technology.* (In Russ.). Available at: <https://sberdevices.ru/smartspeech> (accessed 20.02.2023).

7. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu. Enhancing Estimation Accuracy of Psycho-Emotional State of Operators of Medical Exoskeletons as Intellectual Control Systems with High Degree of Responsibility. *2nd School on Dynamics of Complex Networks and Their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR) (Saratov, Russia, 8–10 Oct., 2018)*. Saratov, 2018:6–8.
8. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu. Enhancing estimation accuracy of psycho-emotional state of operators of medical exoskeletons as intellectual control systems with high degree of responsibility. *Dinamika slozhnykh setey i ikh primeneniye v intellektual'noy robototekhnike: sb. materialov II Mezhdunar. shkoly-konferentsii molodykh uchenykh (g. Saratov 8–10 oktyabrya 2018 g.) = Dynamics of complex networks and their application in intelligent robotics : collection of materials II International. schools-conferences of young scientists (Saratov, October 8-10, 2018)*. Saratov: Nauchnaya kniga, 2018: 32–35.
9. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Artemov I.I., Kulikov M.Yu. Features of the construction of voice control systems for medical exoskeletons of extended functionality. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie = Quality. Innovation. Education*. 2016;(S2):66–72. (In Russ.)
10. *Materinskaya plata Atermiter X99 D4X8 = Atermiter X99 D4X8 motherboard*. (In Russ.). Available at: <https://intel.com> (accessed 20.02.2023).
11. *Protsessor Intel XEON E5-2693v3 = Intel XEON E5-2693v3 processor*. (In Russ.). Available at: <https://intel.com> (accessed 20.02.2023).
12. *Pamyat' operativnaya Samsung DDR4 32GB = Samsung DDR4 32GB RAM*. (In Russ.). Available at: <https://samsung.com> (accessed 20.02.2023).
13. *Graficheskii uskoritel' NVIDIA GeForce RTX 3090 Ti = NVIDIA GeForce RTX 3090 Ti Graphics Accelerator*. (In Russ.). Available at: <https://nvidia.com> (accessed 20.02.2023).
14. *Blok pitaniya postoyannogo toka Taifast Bitcorn ATX 2000W PSU 12V = Taifast Bitcorn ATX 2000W PSU 12V DC power supply*. Available at: <https://taifast.com> (accessed 20.02.2023).
15. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Gorbunov V.N. et al. Development of Natural Emotional Speech Database for Training Automatic Recognition Systems of Stressful Emotions in Human-Robot Interaction. *4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR) (Innopolis, Russia, 7–9 Sept., 2020)*. Innopolis, 2020:11–16.
16. Certificate of state registration of the database No. 2020621102. The verified database of speech signals, relevant to reflect violations of human speech function, registered during stress-traumatic situations (extreme conditions) / A.Y. Tychkov, A.K. Alimudov, A.V. Ageikin, V.N. Gorbunov, E.K. Reva, V.A. Mezhdina // Computer programs, databases, topologies integrated circuits ; application. 12.05.2020 ; publ. 02.07.2020. (In Russ.)
17. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Dudnikov D.S. A new approach to segmentation of speech signals based on time-frequency analysis. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(4):80–92. (In Russ.)
18. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P. et al. Method of processing speech signals based on the method of decomposition into empirical modes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(2):75–89. (In Russ.)
19. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P. et al. Novel EMD-Based Technological Procedure for Speech Signal Processing. *24rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA) (Moscow, Russia, 30 March – 1 April, 2022)*. Moscow, 2022:6.
20. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P. et al. EMD-Based Method for Windowed Filtering of Speech Signals. *5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA) (Kaliningrad, Russia, 13–15 Sept., 2022)*. Kaliningrad, 2022:6–9.

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Алан Казанферович Алимуратов**

кандидат технических наук,  
директор студенческого научно-  
производственного бизнес-инкубатора,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [alansapfir@yandex.ru](mailto:alansapfir@yandex.ru)

##### **Alan K. Alimuradov**

Candidate of technical sciences,  
director of student research and production  
business incubator,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 27.02.2023

Поступила после рецензирования/Revised 24.03.2023

Принята к публикации/Accepted 24.04.2023