

# ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

*Научно-производственный журнал*

№ 3, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

*Зикирбай К. Е., Алимбаева Ж. Н., Алимбаев Ч. А.,  
Молдаш Б. Т., Мусилимов Д. Б.*

СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УЧЕТА  
И УПРАВЛЕНИЯ КОММУНАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ  
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ LoRaWAN

6

*Безбородова О. Е.*

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ МОНИТОРИНГА  
ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ

20

*Ефремов В. А., Мищенко В. И., Мищенко И. В.*

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

29

*Коновалов С. И., Коновалов Р. С., Цаплев В. М.,  
Юлдашев З. М., Нефедьев Д. И.*

СИНТЕЗ И КОРРЕКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ  
В СИСТЕМАХ ИЗЛУЧЕНИЯ-ПРИЕМА.  
АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

39

*Ефремов А. С., Васюкович Д. С., Пузанков С. В.*

ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОВЕРОЧНЫХ ОРГАНОВ

47

*Козлов В. В., Фокина Е. А., Трофимов А. А.*

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА  
ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД  
МЕТОДОМ УЛУЧШЕННОЙ ПОЛНОЙ МНОЖЕСТВЕННОЙ  
ДЕКОМПОЗИЦИИ НА ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЫ

56

*Листюхин В. А., Печерская Е. А., Артамонов Д. В.,  
Зинченко Т. О., Анисимова А. А.*

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСРЕДСТВОМ ВНЕДРЕНИЯ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ  
КОНТРОЛЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

62

## **ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ**

*Светлов А. В., Нгуен Нгок Мань*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ  
РЕЗОНАНСНЫМИ ЧЕТЫРЕХЭЛЕМЕНТНЫМИ  
ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ СХЕМАМИ

69

*Журина А. Е., Емельянов Н. С., Печерская Е. А., Фимин А. В.*

МЕТОД «РЕЗОНАНС–АНТИРЕЗОНАНС»  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ

76

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

*Ашанин В. Н., Ларкин С. Е., Исаев С. Г., Чапаев В. С.*

РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОГО  
АДАПТИВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ  
АВТОТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ

83

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

*Бувич Т. В., Кириллов А. Г., Сакевич В. Н.*

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ШКАЛ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

92

*Трофимов А. А., Гладков А. В., Смирнов И. Е.,*

*Марков Д. М., Недопекин Н. В.*

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО  
ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ  
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

101

*Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К.,*

*Реута Н. С., Бростилов С. А.*

ДИЗЬЮНКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ИНВАРИАНТА  
СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

106

**ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ  
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Тверская С. Ю., Тычков А. Ю., Назарычев А. П.*

КОНТРОЛЬ И КОРРЕКЦИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА

114

**КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ**

*Иванов И. Г., Морозов С. В., Белокопытов М. А.*

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ  
СРЕДСТВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ

121

# MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

*Scientific-production journal*

№ 3, 2022

## CONTENT

### INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

<i>Zikirbay K.E., Alimbaeva Zh.N., Alimbaev Ch.A., Moldash B.T., Musilimov D.B.</i>	
INTELLIGENT SYSTEM FOR ACCOUNTING AND MANAGEMENT OF UTILITY RESOURCES BASED ON LoRaWAN TECHNOLOGY	6
<i>Bezborodova O.E.</i>	
MULTI-AGENT PROCESSING OF DATA MONITORING THE TERRITORIAL TECHNOSPHERE	20
<i>Efremov V.A., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V.</i>	
SEMI – MARKOV MODEL OF THE FUNCTIONING PROCESS MEASURING INSTRUMENTS	29
<i>Konovalov S.I., Konovalov R.S., Tsaplev V.M., Yuldashev Z.M., Nefed'ev D.I.</i>	
SYNTHESIS AND CORRECTION OF ACOUSTIC SIGNALS IN RADIATION-RECEPTION SYSTEMS. CALCULATION AND DESIGN ALGORITHM	39
<i>Efremov A.S., Vasyukovich D.S., Puzankov S.V.</i>	
ASSESSMENT OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF THE FUNCTIONING OF THE SYSTEM OF VERIFICATION BODIES	47
<i>Kozlov V.V., Fokina E.A., Trofimov A.A.</i>	
PRE-PROCESSING OF SIGNAL IN RECOGNITION OF VOICE COMMANDS BY METHOD OF IMPROVED COMPLETE MULTIPLE DECOMPOSITION TO EMPIRICAL MODES	56
<i>Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A., Artamonov D.V., Zinchenko T.O., Anisimova A.A.</i>	
IMPROVING THE RELIABILITY OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES THROUGH THE INTRODUCTION OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS FOR MONITORING THEIR PARAMETERS	62

## DEVICES AND METHODS OF MEASURING

*Svetlov A.V., Nguen Ngok Man'*

DETERMINATION OF PIEZOMATERIAL PRODUCTS  
PARAMETERS EXEMPLIFIED BY FOUR-ELEMENT  
RESONANT EQUIVALENT CIRCUITS

69

*Zhurina A.E., Emelyanov N.S., Pecherskaya E.A., Fimin A.V.*

THE "RESONANCE-ANTIRESONANCE" METHOD  
FOR DETERMINING THE ELECTROPHYSICAL  
PARAMETERS OF PIEZOELECTRICS

76

## ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

*Ashanin V.N., Larkin S.E., Isaev S.G., Chapaev V.S.*

IMPLEMENTING THE CONCEPT OF ADAPTIVE LIGHTING  
OF THE ROAD BY A MOTOR VEHICLE

83

## TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

*Buevich T.V., Kirillov A.G., Sakevich V.N.*

AUTOMATED TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING SCALES  
FOR INFORMATION AND MEASURING DEVICES

92

*Trofimov A.A., Gladkov A.V., Smirnov I.E., Markov D.M., Nedopekin N.V.*

THE ISSUE OF RESEARCH OF MANUFACTURING TECHNOLOGY  
OF HIGH-TEMPERATURE LINEAR DISPLACEMENT SENSOR  
BASED ON METAL-CERAMIC INDUCTANCE COILS

101

*Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S., Brostilov S.A.*

DISJUNCTIVE MODEL OF THE INVARIANT  
CONTROL OBJECT STATUS

106

## MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

*Tverskaya S.Yu., Tychkov A.Yu., Nazarychev A.P.*

CONTROL AND CORRECTION OF INFORMATIVE PARAMETERS  
OF PHYSIOLOGICAL ACTIVITY OF THE BRAIN

114

## CONTROL AND TESTING AIRCRAFT AND THEIR SYSTEMS

*Ivanov I.G., Morozov S.V., Belokopytov M.L.*

IMPROVING THE QUALITY OF TESTING OF SPACE ASSETS  
BY USING A DECISION SUPPORT SYSTEM BASED ON PRECEDENTS

121

# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

## INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.51

doi:10.21685/2307-5538-2022-3-1

### СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УЧЕТА И УПРАВЛЕНИЯ КОММУНАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ LoRaWAN

**К. Е. Зикирбай<sup>1</sup>, Ж. Н. Алимбаева<sup>2</sup>, Ч. А. Алимбаев<sup>3</sup>,  
Б. Т. Молдаш<sup>4</sup>, Д. Б. Мусилимов<sup>5</sup>**

<sup>1,4,5</sup> Казахский национальный исследовательский университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup> Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан

<sup>1</sup>kuanish\_921@mail.ru, <sup>2</sup>zhadyralimbay@gmail.com, <sup>3</sup>chingiz\_kopa@mail.ru,

<sup>4</sup>bibinarsarimova@gmail.com, <sup>5</sup>iamthegreatthanos@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Данное пилотное исследование фокусируется на разработке, внедрении, оптимизации и проверке нового решения интеллектуального измерения потребления электроэнергии и воды для ведения интеллектуального управления и баланса электрическими и водными ресурсами. *Материалы и методы.* Разработанная система состоит из программной платформы и приборов учета энергоресурсов с протоколом IEC62056-21 и CoAP (Constrained Application Protocol) с технологией LoRaWAN. Одним из направлений решения данной задачи является точный контроль и учет энергоресурсов со всех счетчиков, без участия человека. Именно это направление должно обеспечить значительную часть общего энерго-, газо-, водосбережения, потенциал которого составляет более 1/3 всего нынешнего объема потребления. Основой его является инструментальное обеспечение, которое представляет собой совокупность систем приборов и устройств, каналов связи, алгоритмов для контроля и управления параметрами потребления энергоресурсов. *Результаты и выводы.* Базой формирования и развития инструментального обеспечения являются автоматизированные системы комплексного учета коммунальных услуг.

**Ключевые слова:** интеллектуальный учет, LoRaWAN, автоматизированная система комплексного учета коммунальных услуг

**Для цитирования:** Зикирбай К. Е., Алимбаева Ж. Н., Алимбаев Ч. А., Молдаш Б. Т., Мусилимов Д. Б. Система интеллектуального учета и управления коммунальными ресурсами на основе технологии LoRaWAN // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 6–19. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-1

### INTELLIGENT SYSTEM FOR ACCOUNTING AND MANAGEMENT OF UTILITY RESOURCES BASED ON LoRaWAN TECHNOLOGY

**K.E. Zikirbay<sup>1</sup>, Zh.N. Alimbaeva<sup>2</sup>, Ch.A. Alimbaev<sup>3</sup>, B.T. Moldash<sup>4</sup>, D.B. Musilimov<sup>5</sup>**

<sup>1,4,5</sup> K.I. Satpayev Kazakh National Research University, Almaty, The Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup> Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, The Republic of Kazakhstan

<sup>3</sup> Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, The Republic of Kazakhstan

<sup>1</sup>kuanish\_921@mail.ru, <sup>2</sup>zhadyralimbay@gmail.com, <sup>3</sup>chingiz\_kopa@mail.ru,

<sup>4</sup>bibinarsarimova@gmail.com, <sup>5</sup>iamthegreatthanos@gmail.com

**Abstract.** *Background.* This pilot study focuses on the development, implementation, optimization and validation of a new smart metering solution for electricity and water consumption for smart management and balance of electricity and water resources. *Materials and methods.* The developed system consists of a software platform and energy meters with the IEC62056-21 protocol and CoAP (Constrained Application Protocol) with LoRaWAN technology. One of the directions for solving this problem is the precise control and accounting of energy resources from all meters, without human intervention. It is this direction that should provide a significant part of the total energy, gas, water savings, the potential of which is more than 1/3 of the total current consumption. Its basis is instrumental support, which is a set of systems of instruments and devices, communication channels, algorithms for monitoring and managing the parameters of energy consumption. *Results and conclusions.* The basis for the formation and development of instrumental support are automated systems for the integrated accounting of utilities.

**Keywords:** smart accounting, LoRaWAN, automated system for integrated accounting of utilities

**For citation:** Zikirbay K.E., Alimbaeva Zh.N., Alimbaev Ch.A., Moldash B.T., Musilimov D.B. Intelligent system for accounting and management of utility resources based on lorawan technology. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):6–19. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-1

### Введение

Смысл создания и использования автоматизированной системы комплексного учета (АСКУКУ) заключается в постоянной экономии энергоресурсов и финансов коммунальных предприятий при минимальных начальных денежных затратах. Величина экономического эффекта от использования АСКУКУ достигает по предприятиям в среднем 15–30 % от годового потребления энергоресурсов, а окупаемость затрат на создание АСКУКУ происходит за 2–3 квартала [1].

АСКУКУ сохранится как автоматизированная система, позволяющая в первую очередь выявлять все потери энергоресурсов, связанные с неэффективным человеческим участием в процессе энергопотребления. Решение проблем энергосбережения и снижения финансовых потерь на современных предприятиях невозможно без организации комплексного автоматизированного высокоточного контроля и учета энергопотребления. По этой причине разработка многофункциональных АСКУКУ является актуальной задачей, так как большинство действующих автоматизированных систем контроля и учета энергоресурсов выполняют в основном функции учета электроэнергии [2–4].

Развитие технологий IoT (Интернет вещей) позволяет нам использовать интеллектуальные технологии в областях, которые еще невозможно вообразить. Их постоянная интеграция в повседневную жизнь связана с широкой поддержкой проектов «Умный город», в которых собранные данные (потребление воды, газа, электричества или уличного освещения) используются для улучшения качества жизни в городах [5, 6]. Концепция «умного города» предусматривает размещение датчиков в важных узлах распределительной сети, что позволит нам быстро обнаруживать крупные утечки [7, 8]. К основным методам обнаружения утечки воды/газа/электричества относится метод AMR (который также включен в наше решение).

На рынке доступно множество типов счетчиков воды/газа/электроэнергии без необходимой поддержки удаленного считывания показаний. Они предназначены в первую очередь для визуального представления потребления энергоресурсов, когда все еще требуется присутствие человека-оператора. Однако необходимо устанавливать только устройства, которые позволяют использовать удаленное считывание, чтобы повысить энергоэффективность на всем протяжении энергетической цепочки и предоставить потребителям точную, правдивую и надежную информацию об их потреблении энергии. Тем не менее рынок не предлагает открытого и широко известного стандарта связи для передачи данных. Таким образом, большинство производителей разрабатывают собственные решения с использованием новых протоколов связи, таких как LoRaWAN, Sigfox или NarrowBand IoT [9].

Исследование посвящено внедрению удаленной системы IoT для мониторинга потребления электричества/газа/воды (включая возможные утечки) с использованием технологии LoRaWAN. Текущее развитие в области Интернета вещей позволяет нам удовлетворить постоянно растущие потребности в экономном использовании электрических/газовых и водных ресурсов, вызванные текущей климатической ситуацией в Республике Казахстан. Поскольку большинство производителей должны полагаться на покрытие сигнала местными поставщи-

ками, которые взимают ежемесячную плату за каждое устройство, подключенное к их сети, мы также предложили новый недорогой модульный шлюз LoRaWAN. Система также готова к возможной замене коммуникационного модуля на другой тип (например, SigFox).

### Материалы и методы

Весь процесс разработки прототипа описан на рис. 1.



Рис. 1. Концепция интеллектуального счетчика электричества/газа/воды

Предлагаемая платформа является модульной, как показано на рис. 2, и состоит из двух модулей: 1 – несущей платы и 2 – процессорного модуля RisingHF с необходимым протоколом связи. Оба модуля описаны ниже. Из-за использования устройства в водоснабжениях и газоснабжениях необходимо защищать устройство, особенно от повышенной влажности. Для этого используются стандартные распределительные коробки с индексом защиты IP67.

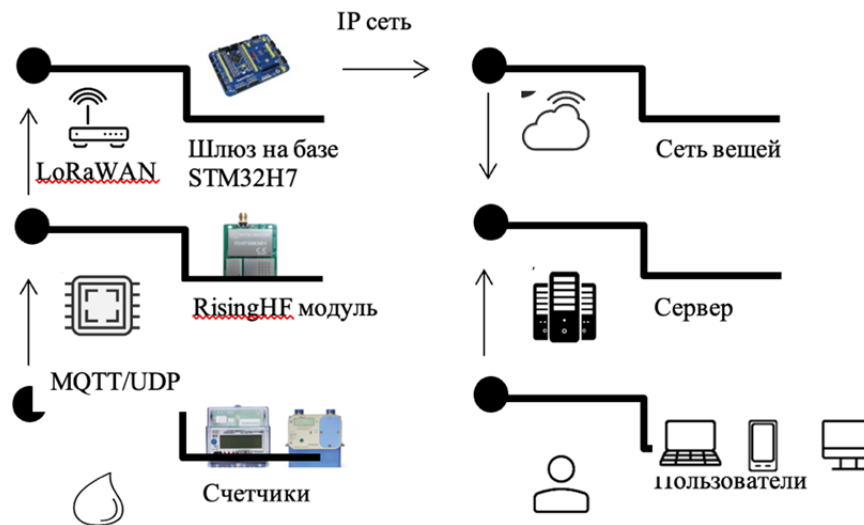


Рис. 2. Концепция предлагаемой системы интеллектуального учета

При предложении решения были установлены следующие требования на основе сотрудничества с компаниями ТОО Корпорация Сайман:

- модульность между модулями, подключенными для чтения данных с датчиков, и остальной частью системы;
- использование исключительно стандартизованных интерфейсов;
- возможность подключения других внешних датчиков (например, датчика наводнения/утечки газа) через эти стандартные интерфейсы;
- преобразователь DC-DC для питания от батареи;
- минимальный срок службы батареи два года;
- интеграция шлюза LoRaWAN в систему передачи данных;



– интервал передачи данных с устройства на шлюз не реже одного раза в час.

Другая часть измерительной цепи включает шлюз, который собирает данные с отдельных датчиков. Используемый шлюз основан на платформе STM32H7 с использованием платы от STM32Microelectronics (Франция). Модульная система предлагаемого устройства включает интерфейсный модуль с двумя входами с открытым коллектором и интерфейс UART для подключения к цифровым интерфейсам, поэтому можно использовать герконовый переключатель и любую имеющуюся в продаже приставку для считывания показаний расходомеров. Защита от перенапряжения и RC-фильтр входов настроены на фильтрацию импульсов менее 20 мс и шума.

Общая схема предлагаемой измерительной системы представлена на рис. 3.

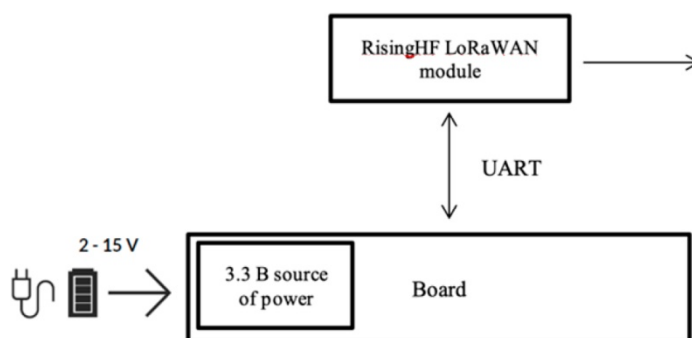


Рис. 3. Схема предлагаемого измерительного датчика

#### ***Плата передатчика DC–DC***

Как показано на рис. 3, несущая плата состоит из разъема питания (JST-PH2) с диапазоном мощности от 2 до 15 В, разъема UART преобразователя и разъемов, выбираемых в зависимости от интерфейсов. Полный дизайн представлен на рис. 4. Блок питания всего устройства спроектирован с учетом защищенной функциональности как в низком диапазоне напряжения LiFePO<sub>4</sub> батареи (2,6 В), так и в высоком диапазоне 12 В аккумулятора (максимум 13 В). Мы предполагаем, что максимальный ток на ветви 3,3 В не превышает 200 мА. В качестве интегрированного импульсного источника питания использовалась повышающая-понижающая микросхема LTC3129. Предлагаемая схема источника питания позволяет отключать процессорный модуль, если он запитан извне, чтобы предотвратить перезаряд между этими источниками. Это подготовка для модуля RisingHF с внешним разъемом (UART), который будет использоваться для питания всего устройства во время программирования.



Рис. 4. Печатная плата (PCB) с модулем RisingHF с интерфейсом UART для считывания показаний с приборов учета

#### ***Блок процессора RisingHF***

Основная часть процессорного блока состоит из модуля, который включает в себя процессор, модем и выбранную периферию (память F-RAM). Блок-схема этого модуля показана на рис. 5 и принципиальная схема – на рис. 6. Периферия микропроцессора подключена к боковой стороне разъема UART. Антенну можно подключить через разъем SMA с проводимостью 50 Ом к модулю LoRaWAN. Основные свойства процессора STM32L07x приведены в работе [10].

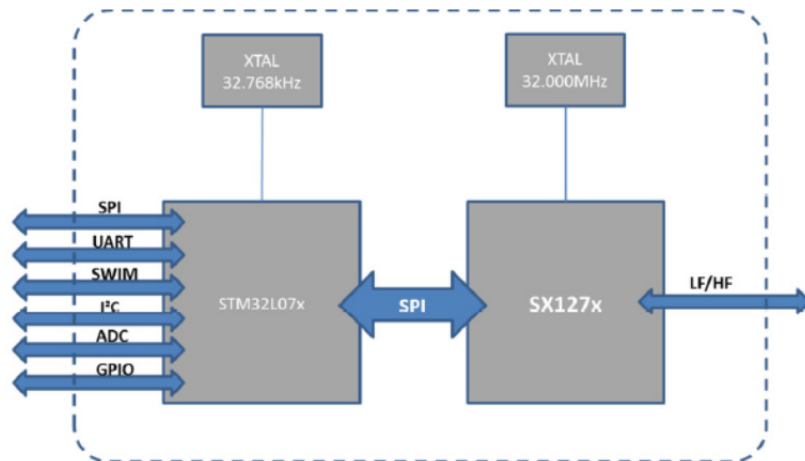


Рис. 5. Блок-схема процессорного модуля

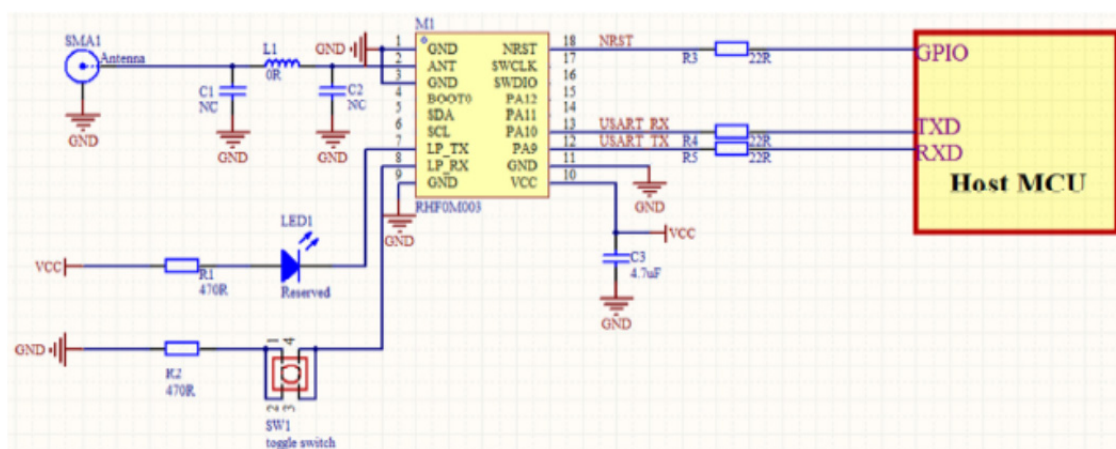


Рис. 6. Принципиальная схема модуля

### Прошивка

Прошивка для выбранного микроконтроллера STM32 на предлагаемой платформе IoT использует экосистему, которая написана на языке функционального программирования Си. Преимущество этого решения – возможность быстро менять функционал исходя из текущих требований (FreeRTOS).

### Частота передачи

Устройство содержит внутреннюю память F-RAM, где текущее состояние счетчика импульсов сохраняется через регулярные промежутки времени, чтобы поддерживать его состояние после отключения электроэнергии. Эти данные впоследствии отправляются через заранее определенный интервал времени с помощью модуля LoRaWAN. В нашем случае временной интервал отправки данных установлен на 1 ч. Минимальный интервал отправки данных – 3 мин.

### Потребление энергии

Для целей проверки и тестирования устройство питалось от сетевой розетки, но теоретический срок службы при работе от батареи (батарея 3xAA LR6) составляет минимум два года с интервалом отправки полученных данных в 1 ч (счетчик импульсов, влажность и температура) (расчет на основе STM32CubeMX). Общее потребление при 132 мкА составляет 3,0 В.

### LoRaWAN шлюз

Шлюз основан на платформе STM32H7, к которой объединительная плата iC880A подключена через шину SPI (последовательный периферийный интерфейс). Объединительная

плата представляет собой плату для подключения iC880A-SPI к STM32H7 и служит для питания STM32H7 и самой платы RisingHF (см. рис. 6). Модуль RisingHF можно использовать во многих приложениях, таких как интеллектуальное измерение, IoT или построение сети M2M. Он может получать пакеты от нескольких разных конечных точек одновременно, когда они отправляются с разными настройками SF, по восьми каналам одновременно. Следовательно, он обеспечивает возможность надежной связи между шлюзом и большим количеством конечных точек в разных расстояниях.

Как только данные получены шлюзом, они немедленно отправляются через IP-сеть на сервер, где данные обрабатываются и оцениваются.

### Технология передачи LoRaWAN

Шлюз, основанный на технологии LoRaWAN, представляет собой протокол беспроводной сети с низким энергопотреблением, предлагаемый для недорогой и безопасной связи в области Интернета вещей. LoRa – это физический уровень, используемый для установления удаленного канала связи, основанный на модуляции Chirp-Spread-Spectrum, которая сохраняет те же свойства низкого энергопотребления, что и модуляция FSK (частотно-сдвиговая манипуляция), но значительно увеличивает возможный диапазон связи. Технология Chirp-Spread-Spectrum используется в основном в военной и космической сферах из-за возможных больших расстояний связи и устойчив к помехам. LoRa – первая недорогая реализация этой технологии для коммерческого использования [9].

Еще одно преимущество LoRa – возможность гибкой настройки, позволяющей менять диапазон сигнала путем настройки полосы пропускания ( $BW$ ), коэффициента расширения ( $SF$ ) и скорости кодирования ( $CR$ ). Согласно техническим требованиям KZ865-868 для промышленности, науки и медицины ( $ISM$ ) полоса пропускания может достигать значений 125, 250 и 500 кГц.  $SF$  может быть установлен в диапазоне от 7 до 12, когда он достигает значение 7 для междугородной связи (до 4 км в зависимости от окружающей среды) и значение 12 для междугородной связи.  $CR$  повышает надежность приема кода 4-битных данных с избыточностью для исправления ошибок в вариантах 4/5, 4/6, 4/7 или 4/8. Битрейт LoRa рассчитывается согласно следующему уравнению [11, 12]:

$$R_b = SF \frac{BW}{2^{SF}} \frac{4}{4 + CR} \left[ \text{bit s}^{-1} \right], \quad (1)$$

где  $SF$  – фактор распространения;  $BW$  – ширина полосы;  $CR$  – кодовая скорость.

Уравнение (1) показывает, что  $SF$  является одним из доминирующих факторов при вычислении битовой скорости, которая определяет физическую скорость передачи данных (скорость передачи данных ( $DR$ ), ( $DT$ )).

Узлы в сети LoRaWAN являются асинхронными, и связь прекращается после того, как данные готовы к отправке, независимо от того, является ли это условие управляемым событием или запланированным. Узлам часто приходится «просыпаться» в ячеистой или синхронной сети, например сотовой, синхронизироваться с сетью и проверять сообщение. Эта синхронизация потребляет значительное количество энергии и является основной причиной сокращения срока службы батареи. Терминальное оборудование также используется для разных приложений и предъявляет совершенно разные требования. Терминальное оборудование класса  $A$  обеспечивает двустороннюю связь, когда за каждой передачей оконечного оборудования по восходящей линии связи следуют два коротких окна приема для нисходящей линии связи.

Излучающий слот оконечного оборудования основан на его собственных коммуникационных потребностях (протокол LoRa). Следовательно, терминальному оборудованию требуется связь по нисходящей линии связи от сервера вскоре после того, как она отправила восходящую линию связи на сервер. Любая другая связь по нисходящей линии связи должна ждать, прежде чем следующий датчик начнет излучение. Терминальное оборудование класса  $B$  открывает другие окна приема, такие как реакция на триггер от шлюза, указывающий на «прослушивание» оконечного оборудования. Терминальное оборудование класса  $C$  имеет практически постоянно открытые окна приема, закрывающиеся только во время передачи данных на сервер [13].

Концепция устройства соответствует требованиям для отнесения к классу *A* для приборов учета воды и газа, так как эти виды счетчиков будут работать от батарейки и требуют низкого энергопотребления, а для счетчиков электричества используется класс *C*, что позволяет получить мгновенные данные.

### Результаты

Экспериментальное рабочее место было построено для первичного тестирования, как показано на рис. 7. Испытательная схема состояла из плат приборов учета электроэнергии, газа, воды и платы базовой станции. Счетчики воды и газа работают автономно, так как были подключены батарейки: одна батарейка для коммуникационной части по технологиям LoRaWAN, вторая обеспечивает измерение. В данных счетчиках используется класс *A*. Для счетчиков электроэнергии класса 1,09 не требуется дополнительного батарейного питания. Это дает возможность считывать технологические параметры сигнала в режиме реального времени.



Рис. 7. Схема лабораторных испытаний

На рис. 8 показан график лабораторного эксперимента по передаче данных водных счетчиков. Для счетчиков воды испытания проводилось в течение месяца, так как данные с этих приборов мы получаем раз сутки. На рис. 8 видно данные, которые не превышают 2 кБит данных ежедневно, а также видно, что когда мы поставили базовую станцию в подвал, получилась потеря данных в датах 04/03–06/03. Данная информация отражается в системе eu1.loriot.com, куда мы подключили базовую станцию для передачи данных от устройств для дальнейшего анализа.

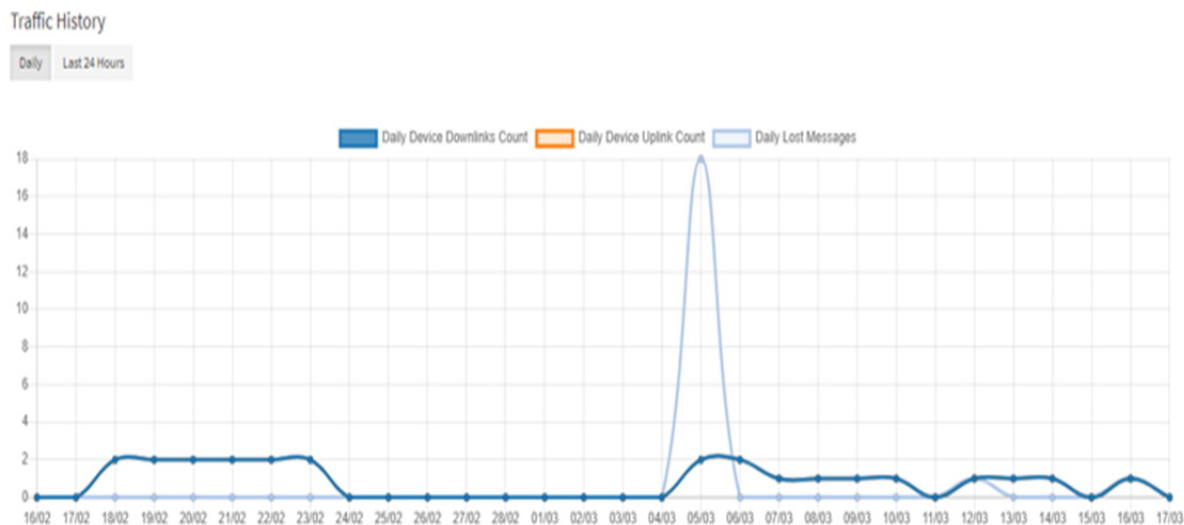


Рис. 8. График передачи данных по дням

На рис. 9 показано соотношение шума к полезному сигналу данных от водосчетчика к базовой станции. Во время теста было изменено местоположение базовой станции для проверки качества сигнала, а также при поиске оптимальной частоты для казахстанских сетей.

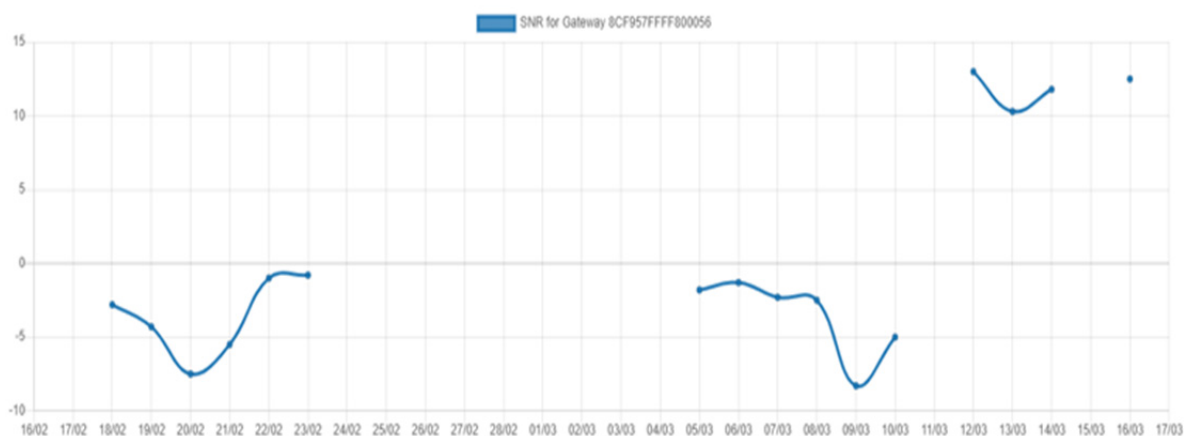


Рис. 9. Качество передаваемой информации

### Тест покрытия сигнала

Измерения проводились в городе Алматы в Алмалинском районе (площадь 18,4 км<sup>2</sup>). Цель заключалась в сравнении распространения сигнала и его радиуса в городских условиях района Алматы (рис. 10).

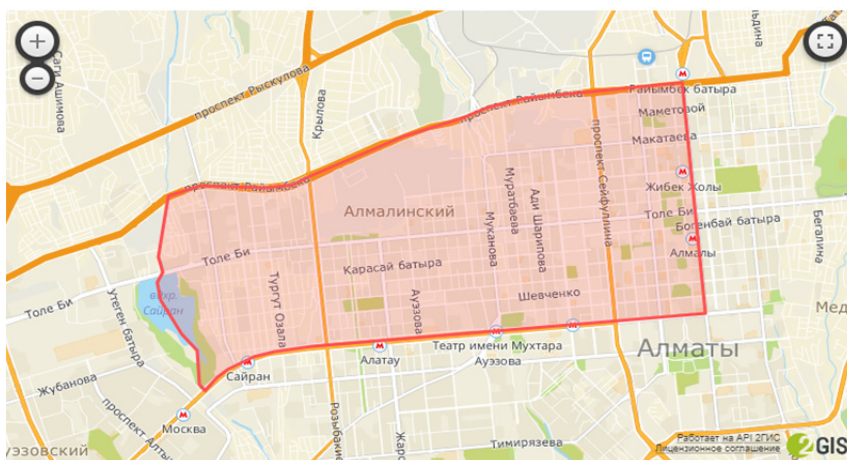


Рис. 10. Границы Алмалинского района города Алматы

Использовалась базовая версия предлагаемой печатной платы (PCB) со встроенным датчиком измерения показания воды, а батарейки CR17450 (для передачи данных по технологии LoRaWAN) и ER14250 (для измерительной части) с напряжением 3,3 В. Все устройство показано на рис. 11.



Рис. 11. Мобильная измерительная система

Измерение проводилось с помощью личного кабинета в системе <https://eu1.loriot.io/dashboard>. Первым шагом является регистрация шлюза на данном сайте, где задаются координаты GPS, частотный план и тип антенны. Второй шаг требует регистрации в сети, определяемой измерительным устройством (в нашем случае Water Meter № 5) с присвоением идентификатора DevEUI. В записи измерения собираются все данные, которые собираются зарегистрированным шлюзом.

### *Испытания зоны покрытия вне помещений с антенной 4.5 dBi*

Были установлены базовая станция (БС) RisingHF и антенна 4,5 dBi, которая на тот момент шла в комплекте с БС. Провели предварительное тестирование зоны покрытия вне помещений. На карте ниже (рис. 12) показаны результаты нашего первого тестирования измерения: зеленым отмечен успешный прием сигнала БС, красным – нет.

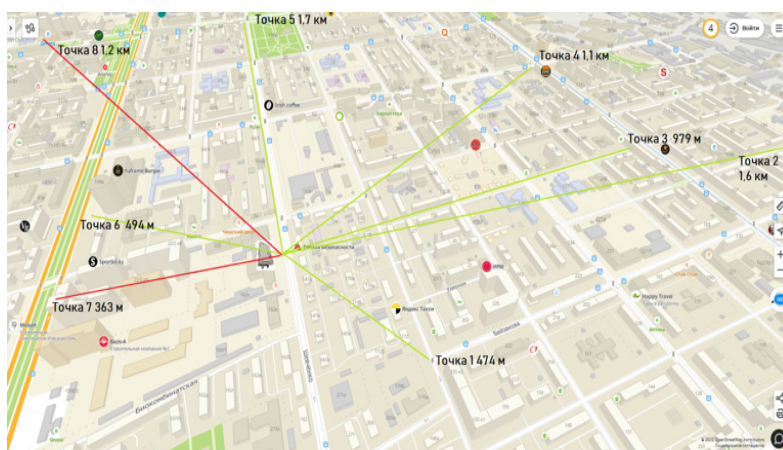


Рис. 12. Измерение силы сигнала при антенне 4.5 dBi

Зона покрытия с комплектной антенной далека от максимальной для LoRaWAN, и в нашем случае составила 2 км. Стало понятно, что надо тщательней подходить к установке базовой станции, заявленные 10 км без хорошей антенны и минимального радиопланирования даже на открытой местности получить нельзя.

### *Второй этап испытаний с антенной 10 dBi*

Были установлены базовая станция RisingHF и антенна 10 dBi снаружи зданий. Далее провели тестирование на дальность связи в условиях города снаружи помещений. Модемы использовали в режиме эмуляции посылки импульсов, без подключения ПУ. На расстоянии до 5 км от БС пакеты проходили успешно, таким образом, максимальное расстояние, которое удалось получить вне помещений, – 5 км (рис. 13).



Рис. 13. Измерение силы сигнала при антенне 10 dBi

Слабый сигнал зафиксирован только на окраине границы района, в южном и юго-восточном направлениях. Здесь уровень сигнала варьировался от 115 до 120 дБ из-за высоты и относительно высокой плотности застройки. Однако эти значения сигналов не препятствуют успешной передаче данных. Покрытие не полностью измеренной области рассчитывается с помощью интерполяции.

### *Измерение в реальных условиях*

Работоспособность системы проверена по показаниям холодной и горячей воды в малоэтажном многоквартирном доме. Результаты были записаны вручную для проверки точности измерения и показаны на рис. 14 (горячая вода) и рис. 15 (холодная вода).

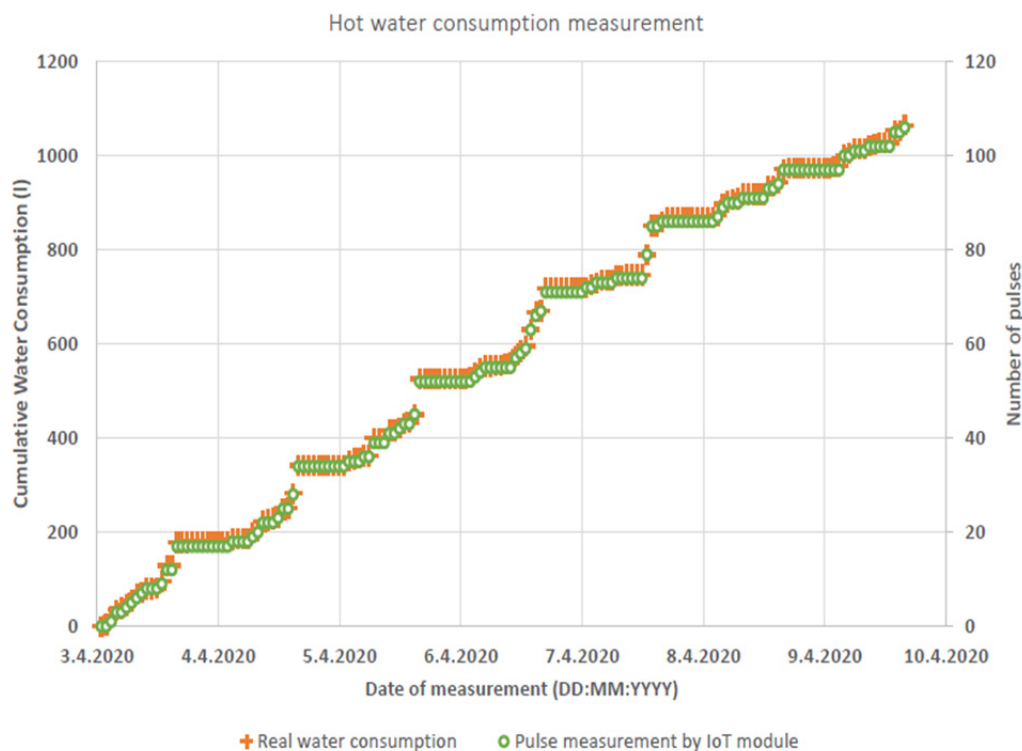


Рис. 14. Сравнение дистанционного и ручного считывания – горячая вода

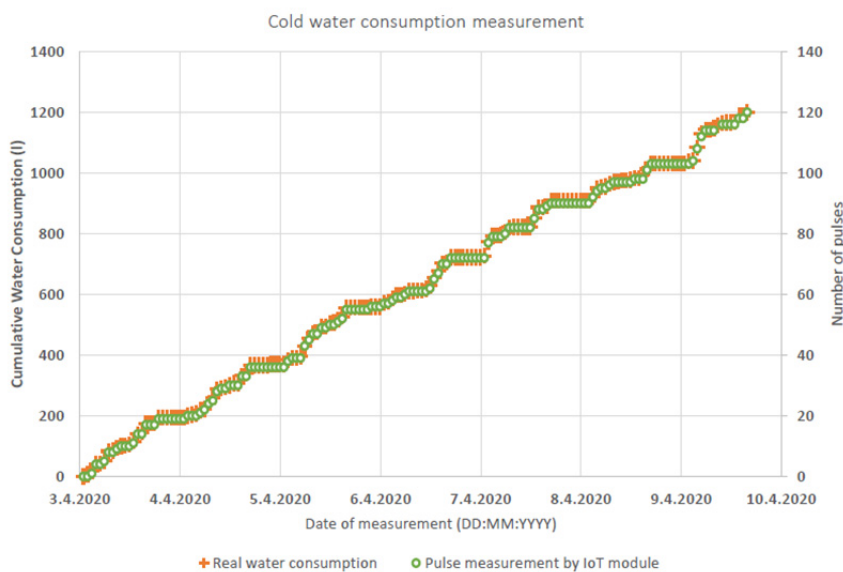


Рис. 15. Сравнение дистанционного и ручного считывания – холодная вода

Частота автоматического и ручного сбора данных была установлена на 1 ч. Впоследствии данные были сопряжены вручную в соответствии с отметкой времени. Эта временная метка содержала каждое исходящее сообщение в следующем формате: ГГГГ–ММ–ДД ЧЧ:ММ:СС. Используемый метод обнаружения утечек воды – это так называемый метод MNF (минимальный ночной поток), широко используемый в водоснабжении. Это поток, который течет в определенную зону/измерительный район в ночное время, когда наиболее допустимое потребление воды находится на минимальном уровне. Период минимального ночного стока обычно приходится на два-четыре часа ночи. В нашем случае (измерение расхода воды в квартире в малоэтажном доме) период MNF был установлен с 23:59 до 6:00, при этом пороговое значение было установлено на 10 л. Если расход в системе превышает это значение, предполагается утечка воды.

График квантиль-квантиль или график q-q – это исследовательское графическое устройство, используемое для проверки достоверности предположения о распределении для набора данных. Если данные действительно соответствуют предполагаемому распределению, то точки на графике q-q будут располагаться приблизительно на прямой линии. График q-q обеспечивает визуальное сравнение квантилей выборки с соответствующими теоретическими квантилями. В общем, если точки на графике q-q отклоняются от прямой линии, то предполагаемое распределение ставится под сомнение. Графики q-q можно рассматривать как «миллиметровую бумагу для вероятностей», которая превращает график упорядоченных значений данных в прямую линию (рис. 16, 17).

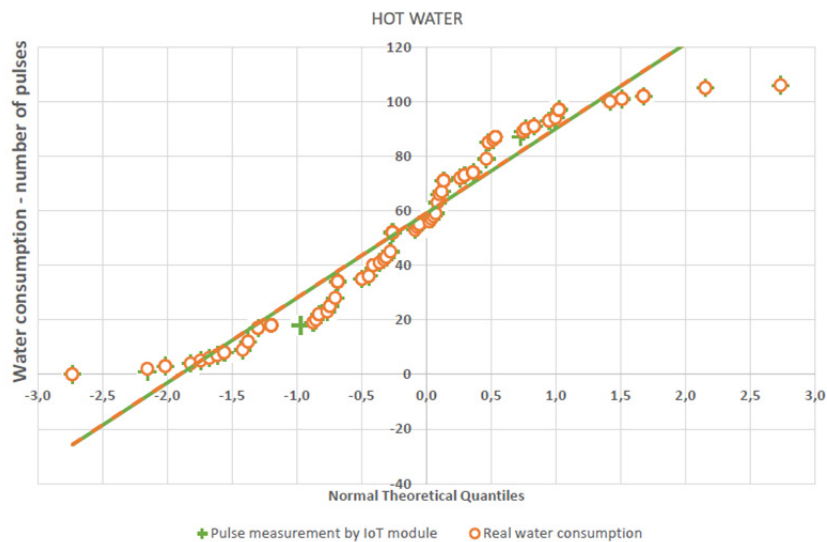


Рис. 16. График q-q – горячая вода

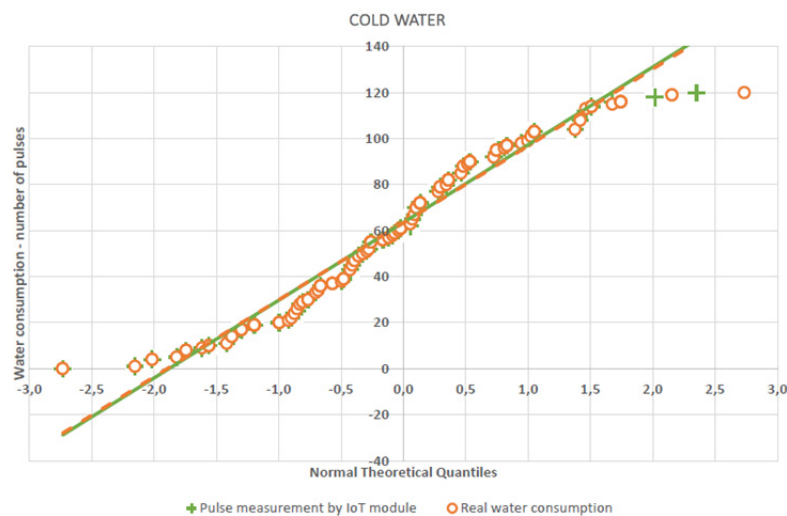


Рис. 17. График q-q – холодная вода



Как видно на рис. 16 и 17, полученные линии линейной регрессии перекрывают друг друга. Таким образом, оба метода измерения имеют одинаковую плотность вероятности. Таким образом, метод измерения с помощью датчика IoT актуален для практического применения.

### Заключение

Разработана автоматизированная система комплексного учета коммунальных услуг для интеллектуального измерения потребления электроэнергии и воды. Был использован комплексный подход к системе учета энергоресурсов на базе технологий LoRaWAN и разработаны прототипы модемов и базовых станций, работающих под казахстанский частотный спектр.

Испытывалось качество передаваемой информации с приборов учета с помощью модуля LoRaWAN. Также был исследован охват сигнала технологий LoRaWAN с изменением расположения базовой станции и изменением уровней мощности антенны. После испытаний был достигнут при использовании антенны с 10 dbm хороший охват.

### Список литературы

1. Mikhailov P., Zikirbai K., Bazarbai L. et al. Internet of energy things based on wireless LoRaWAN // XXI century: Results of the past and problems of the present plus. 2021. Vol. 10, iss. 3. P. 47–52. doi:10.46548/21vek-2021-1055-0008
2. Volker B., Reinhardt A., Faustine A., Pereira L. Watt's up at Home? Smart Meter Data Analytics from a Consumer-Centric Perspective // Energies. 2021. Vol. 14, iss. 3. doi:10.3390/en14030719
3. Amankhan A., Kural A., Temirbek I. et al. Multi-functional Smart Electricity Metering System // 19th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) / 3rd IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe Conference (I and CPS Europe), Univ. Genoa, Genova, Italy. 2019.
4. Corbett J., Wardle K., Chen C. Toward a Sustainable Modern Electricity Grid: The Effects of Smart Metering and Program Investments on Demand-Side Management Performance in the US Electricity Sector 2009-2012 // IEEE Transactions on Engineering Management. 2018. Vol. 65, iss. 2. P. 252–263. doi:10.1109/TEM.2017.2785315
5. Kumaran K., Chinnadurai M., Manikandan S. et al. An IoT based Green Home Architecture for Green Score Calculation towards Smart Sustainable Cities // KSII Transactions on Internet and Information Systems. 2021. Vol. 15, iss. 7. P. 2377–2398. doi:10.3837/tiis.2021.07.005
6. Lloret J., Tomas J., Canovas A., Parra L. An Integrated IoT Architecture for Smart Metering // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54, iss. 12. P. 50–57. doi:10.1109/MCOM.2016.1600647CM
7. Nadeem A., Arshad N. A data-driven approach to reduce electricity theft in developing countries // Utilities Policy. 2021. Vol. 73. doi:10.1016/j.jup.2021.101304
8. Farah E., Shahrour I. Smart Water for Leakage Detection: Feedback about the Use of Automated Meter Reading Technology // Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET), 2017.
9. Zikirbay K., Alimbayev C., Bayanbay N. et al. Interior Coating and Performance of LORA in Industrial Conditions // Science Week SPbPU. St. Petersburg, 2019.
10. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm321072cz.pdf>
11. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things // Sensors. 2016. Vol. 16, iss. 9. Article Number 1466. doi:10.3390/s16091466
12. Alimbayev Ch., Alimbayeva Zh., Ozhikenov K. et al. Development of Measuring System for Determining Life-Threatening Cardiac Arrhythmias in a Patient's Free Activity // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 1. P. 12–22. doi:10.15587/1729-4061.2020.197079
13. Xu T., Zhao M. A LoRaWAN-MAC Protocol Based on WSN Residual Energy to Adjust Duty Cycle // IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. 2020. P. 1415–1420. doi:10.1109/ICDCS47774.2020.00187

### References

1. Mikhailov P., Zikirbai K., Bazarbai L. et al. Internet of energy things based on wireless LoRaWAN. XXI century: Results of the past and problems of the present plus. 2021;10(3):47–52. doi:10.46548/21vek-2021-1055-0008
2. Volker B., Reinhardt A., Faustine A., Pereira L. Watt's up at Home? Smart Meter Data Analytics from a Consumer-Centric Perspective. Energies. 2021;14(3). doi:10.3390/en14030719
3. Amankhan A., Kural A., Temirbek I. et al. Multi-functional Smart Electricity Metering System. 19th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) / 3rd IEEE Industri-

- al and Commercial Power Systems Europe Conference (I and CPS Europe), Univ. Genoa, Genova, Italy. 2019.*
4. Corbett J., Wardle K., Chen C. Toward a Sustainable Modern Electricity Grid: The Effects of Smart Metering and Program Investments on Demand-Side Management Performance in the US Electricity Sector 2009-2012. *IEEE Transactions on Engineering Management.* 2018;65(2):252–263. doi:10.1109/TEM.2017.2785315
  5. Kumaran K., Chinnadurai M., Manikandan S. et al. An IoT based Green Home Architecture for Green Score Calculation towards Smart Sustainable Cities. *KSII Transactions on Internet and Information Systems.* 2021;15(7):2377–2398. doi:10.3837/tiis.2021.07.005
  6. Lloret J., Tomas J., Canovas A., Parra L. An Integrated IoT Architecture for Smart Metering. *IEEE Communications Magazine.* 2016;54(12):50–57. doi:10.1109/MCOM.2016.1600647CM
  7. Nadeem A., Arshad N. A data-driven approach to reduce electricity theft in developing countries. *Utilities Policy.* 2021;73. doi:10.1016/j.jup.2021.101304
  8. Farah E., Shahrour I. Smart Water for Leakage Detection: Feedback about the Use of Automated Meter Reading Technology. *Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET), 2017.*
  9. Zikirbay K., Alimbayev C., Bayanbay N. et al. Interior Coating and Performance of LORA in Industrial Conditions. *Science Week SPbPU.* Saint Petersburg, 2019.
  10. Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm321072cz.pdf>
  11. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors.* 2016;16(9). doi:10.3390/s16091466
  12. Alimbayev Ch., Alimbayeva Zh., Ozhikenov K. et al. Development of Measuring System for Determining Life-Threatening Cardiac Arrhythmias in a Patient's Free Activity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2020;1:12–22. doi:10.15587/1729-4061.2020.197079
  13. Xu T., Zhao M. A LoRaWAN-MAC Protocol Based on WSN Residual Energy to Adjust Duty Cycle. *IEEE International Conference on Distributed Computing Systems.* 2020:1415–1420. doi:10.1109/ICDCS47774.2020.00187

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

##### **Куаныш Ергараевич Зикирбай**

докторант,  
Казахский национальный исследовательский университет имени К. И. Сатпаева  
(Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а)  
E-mail: kuanish\_921@mail.ru

##### **Kuanysh E. Zikirbay**

Doctoral student,  
K.I. Satpayev Kazakh National Research University  
(22a Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

##### **Жадыра Нурдаулетовна Алимбаева**

преподаватель кафедры информатики и прикладной математики,  
Казахский национальный женский педагогический университет  
(Казахстан, г. Алматы, ул. Айтеке би, 99)  
E-mail: zhadyralimbay@gmail.com

##### **Zhadyra N. Alimbaeva**

Teacher of the sub-department of informatics and applied mathematics,  
Kazakh National Women's Teacher Training University  
(99 Ayteke bi street, Almaty, Kazakhstan)

##### **Чингиз Абдраимович Алимбаев**

PhD, старший научный сотрудник,  
Институт механики и машиноведения имени академика У. А. Джолдасбекова  
(Казахстан, г. Алматы, ул. Курмангазы, 29)  
E-mail: chingiz\_kopa@mail.ru

##### **Chingiz A. Alimbaev**

PhD, senior researcher,  
Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering  
(29 Kurmangazy street, Almaty, Kazakhstan)

##### **Бибинур Талгатовна Молдаш**

магистрант,  
Казахский национальный исследовательский университет имени К. И. Сатпаева  
(Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а)  
E-mail: bibinursarimova@gmail.com

##### **Bibinur T. Moldash**

Master degree student,  
K.I. Satpayev Kazakh National Research University  
(22a Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

**Динмухамед Бахытович Мусилимов**

магистрант,

Казахский национальный исследовательский  
университет имени К. И. Сатпаева

(Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а)

E-mail: iamthegreatthanos@gmail.com

**Dinmukhamed B. Musilimov**

Master degree student,

K.I. Satpayev Kazakh National Research University  
(22a Satpayev street, Almaty, Kazakhstan)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 29.03.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 29.04.2022**

**Принята к публикации/Accepted 30.05.2022**

УДК 504.064.36  
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-2

## МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ

**О. Е. Безбородова**

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
oxana243@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Повышение эффективности мониторинга территориальной техносферы необходимо для обеспечения экологического благополучия человека. Поэтому важны интеллектуализация процессов сбора и обработки данных, минимизация вероятности человеческой ошибки и возможность быстрой адаптации информационно-измерительных и управляющих систем к изменяющимся требованиям внешней среды за счет использования мультиагентной обработки данных. *Материалы и методы.* Приведен обзор и анализ существующих систем мониторинга окружающей среды. Анализ показал, что большинство существующих систем мониторинга не являются универсальными и не способны комплексно оценивать безопасность территориальной техносферы. Другим недостатком этих разработок является отсутствие моделирования динамики угроз. Все эти системы не имеют возможности связаться с другими системами мониторинга и для анализа и сравнения могут использовать только «свою» информацию, что не позволяет в полном объеме оценить ситуацию в территориальной техносфере. *Результаты.* Для задач комплексного мониторинга территориальной техносферы предложено использовать мультиагентную обработку и объединить получаемые данные в систему комплексных показателей, поддающихся многокритериальной оценке. Системы, построенные на основе мультиагентных технологий, относятся к открытым системам, что предполагает наличие развитых возможностей и средств адаптации к изменениям среды, в том числе путем модификации своей структуры и параметров. Возможности мультиагентных технологий при решении этих задач обусловлены не только возможностью оперировать огромными массивами данных, но и системным подходом при их обработке, устойчивостью к случайным искажениям информации (робастностью), возможностью учитывать самые различные данные (элиминация), а также способностью принимать многокритериальные решения. *Выводы.* Разработанные модели поведения агентов обеспечивают взаимодействие контролирующих органов и предприятий, самостоятельно находят варианты и принимают индивидуальные решения для всех факторов, обладающих множеством персональных особенностей, генерируя предложения по индивидуальным схемам принятия решений. С функциональной точки зрения модель комплексного мониторинга территориальной техносферы позволяет: прогнозировать результат действия, сравнивать прогноз и результат, принимать стратегию действий и корректировать ее при всевозможных изменениях среды.

**Ключевые слова:** территориальная техносфера, комплексный мониторинг, мультиагентные технологии, гиперкомплексные числа, многокритериальная оценка

**Для цитирования:** Безбородова О. Е. Мультиагентная обработка данных мониторинга территориальной техносферы // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 20–28. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-2

## MULTI-AGENT PROCESSING OF DATA MONITORING THE TERRITORIAL TECHNOSPHERE

**O.E. Bezborodova**

Penza State University, Penza, Russia  
oxana243@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* Increasing the effectiveness of monitoring the territorial technosphere is necessary to ensure the ecological well-being of a person. Therefore, the intellectualization of data collection and processing processes, minimization of the probability of human error and the ability to quickly adapt information-measuring and control systems to changing environmental requirements through the use of multi-agent data processing are important. *Materials and methods.* The article provides an overview and analysis of existing environmental monitoring systems. The analysis showed that most of the existing monitoring systems are not universal and are not capable of comprehensively assessing

the security of the territorial technosphere. Another disadvantage of these developments is the lack of threat dynamics modeling. All these systems do not have the ability to communicate with other monitoring systems and can only use "their own" information for analysis and comparison, which does not allow a full assessment of the situation in the territorial technosphere. *Results.* For the tasks of complex monitoring of the territorial technosphere, it is proposed to use multi-agent processing and combine the data obtained into a system of complex indicators that can be assessed by multi-criteria. Systems built on the basis of multi-agent technologies are classified as open systems, which implies the presence of advanced capabilities and means of adapting to changes in the environment, including by modifying their structure and parameters. The capabilities of multi-agent technologies in solving these problems are due not only to the ability to operate with huge data arrays, but also to a systematic approach to their processing, resistance to random information distortions (robustness), the ability to take into account a wide variety of data (elimination), as well as the ability to make multicriteria decisions. *Conclusions.* The developed agent behavior models provide interaction between regulatory authorities and enterprises, independently find options and make individual decisions for all factors that have many personal characteristics, generating proposals for individual decision-making schemes. From a functional point of view, the model of integrated monitoring of the territorial technosphere allows: predicting the result of an action, comparing the forecast and the result, adopting an action strategy and adjusting it with all kinds of changes in the environment.

**Keywords:** territorial technosphere, complex monitoring, multi-agent technologies, hypercomplex numbers, multicriteria assessment

**For citation:** Bezborodova O.E. Multi-agent processing of data monitoring the territorial technosphere. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):20–28. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-2

### *Постановка проблемы*

Техносферное развитие человечества неизменно приводит не только к увеличению уровня жизни людей, но и к снижению уровня защищенности среды его жизнедеятельности. С увеличением количества объектов техносферы увеличивается риск и количество катастроф природного и техногенного характера. В 2021 г. 150 природных и 158 антропогенных катастроф в мире послужили причиной гибели и пропажи без вести почти 26 тысяч человек и принесли ущерб мировой экономике в размере 140 млрд долл. Это обусловлено корреляцией размещения объектов техносферы и центров концентрации населения. На рис. 1 изменением интенсивности окраски показаны места локализации объектов техносферы и населения.



Рис. 1. Локализация населения и объектов техносферы

Совмещение этих параметров связано с социальными, экономическими и географическими аспектами развития цивилизации и ведет к постоянному росту количества техногенных катастроф и их жертв.

Масштабы разрушений и прочие последствия техногенных катастроф побудили развитые промышленные страны обратить внимание на вопросы техносферной безопасности. Во всех странах на защиту общества и окружающей среды от техносферных опасностей выделяются огромные средства, призванные компенсировать причиняемый ущерб. Однако если не

менять качественные и количественные подходы и характеристики хозяйственной деятельности человека с учетом требований безопасности и достижений научно-технического прогресса, желаемая эффективность процессов не будет достигнута. В связи с этим актуальность вопросов, связанных с управлением техносферной безопасностью посредством комплексного мониторинга, представляется очевидной.

### *Материалы и методы*

Вопросы и проблемы создания систем комплексного мониторинга территориальной техносферы описаны в большом количестве источников [1–3]. В этих работах комплексный мониторинг рассматривается как система наблюдения, контроля и анализа (прогнозирования) динамики состояний объектов техносферы. И учитывая разнородность объектов техносферы и характеризующих их параметров, а также уже существующие частные системы мониторинга (экологический, экономический, социальный и пр.), интегрирует эти системы в единую систему.

Территориальная техносфера в этом случае рассматривается как динамическая система, структура которой приведена на рис. 2 [4].

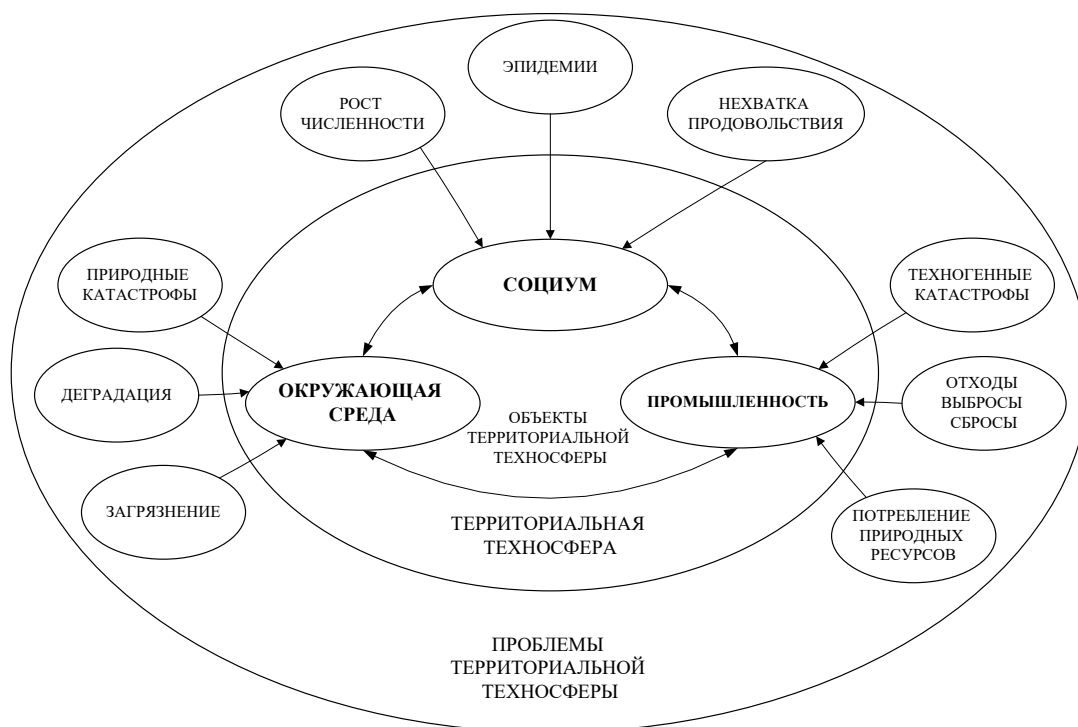


Рис. 2. Структура территориальной техносферы

Взаимодействие объектов территориальной техносферы, кроме формирования среды жизнедеятельности современного человека, создает большое количество проблем, влияющих на безопасность нахождения человека в этой среде. И комплексный мониторинг территориальной техносферы позволяет контролировать уровень безопасности.

Существует большое количество различных схем комплексного мониторинга территориальной техносферы [5–8]. Анализ этих источников показывает, что большинство существующих систем мониторинга не являются универсальными и не способны комплексно оценивать безопасность территориальной техносферы. Другим недостатком этих разработок является отсутствие моделирования динамики угроз. Все эти системы не имеют возможности связаться с другими системами мониторинга и для анализа и сравнения могут использовать только «свою» информацию, что не позволяет в полном объеме оценить ситуацию в территориальной техносфере.

Стоит отметить, что объем информации, получаемой и накапливаемой в процессе комплексного мониторинга, исключительно велик. Кроме того, это гетерогенная информация, так

как характеризует качество различных объектов территориальной техносферы. Совершенно очевидно, что практически работать с таким количеством материала невозможно. Для задач комплексного мониторинга территориальной техносферы она должна быть объединена в систему комплексных показателей, поддающихся многокритериальной оценке. Для этого более подходят критерии качества объектов территориальной техносферы, которые позволяют на количественном и качественном уровнях проводить измерения и оценку происходящих в каждом объекте территориальной техносферы изменений, а также осуществлять прогноз этих изменений во времени на основе многокритериальной оценки. По совокупности значений гетерогенных параметров и критериев должно быть возможно судить об изменениях качества объектов территориальной техносферы, оценивать эффективность осуществляемых для этого мероприятий, регулировать качество объектов территориальной техносферы.

Подобный подход позволяет проследить взаимное влияние объектов территориальной техносферы, а также критические уровни качества каждого из них (максимальный и минимальный). Максимальный уровень соответствует критическим предельным воздействиям на объект, когда в нем начинаются необратимые изменения, выводящие его из состояния динамического равновесия и устойчивости. Минимальный уровень соответствует допустимым воздействиям на объект, когда в нем происходят обратимые изменения, которые могут быть компенсированы за счет специальных мероприятий и не выводят объект из состояния динамического равновесия и устойчивости. Интервал между максимальным и минимальным уровнем, когда объект территориальной техносферы способен к устойчивому развитию, позволяет нагружать территориальную техносферу (развивать промышленность, сельское хозяйство и пр.) без нежелательных изменений. Такое состояние соответствует нагрузке, при которой возможно длительное нормальное функционирование территориальной техносферы.

Создание и эксплуатация компьютерной базы данных с результатами комплексного мониторинга превратили бы статистический метод исследования (наряду с экспериментальным и расчетно-теоретическим методом) в эффективно работающий инструмент решения основных проблем промышленной безопасности: изучения динамики воздействий, ведущих к авариям; создания систем безопасности и разработки безопасных технологий; научного обеспечения действий по проведению поисково-спасательных работ и защите населения при техносферных авариях, а также ликвидации последствий таких аварий.

Для решения поставленных задач необходимо использовать мультиагентные технологии. В работах [9, 10] описаны схемы использования мультиагентных технологий для целей мониторинга.

Предпочтительно для оценки качества каждого из объектов территориальной техносферы ( $K_{Tj}$ ) использовать не просто значение одного из многих ( $n$ ) действующих поражающих факторов, а сумму отношений значений каждого  $i$ -го поражающего фактора ( $Y_i$ ) к величине предельного норматива ( $P_i$ ) для этого фактора с учетом весового коэффициента (коэффициента значимости) для каждого фактора ( $q_i$ ):

$$K_{Tj} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot Y_i / P_i. \quad (1)$$

При оценке качества всей территориальной техносферы величины  $K_{Tj}$  для отдельных объектов могут быть суммированы в интегральный критерий качества территориальной техносферы ( $K_{TT}$ ) по формуле

$$K_{TT} = \bigcup_{j=1}^m \text{ent} [K_{Tj}]. \quad (2)$$

При анализе полученного по формуле (2) результата получаем информацию о соответствии территориальной техносферы требованиям безопасности. И если хотя бы один из анализируемых параметров  $Y_i$  или  $K_{Tj}$  больше 1, т.е. не соответствует величине предельного норматива, система выдает сигнал бедствия и требует корректирующего воздействия.

Выполнять эти операции предпочтительнее с использованием мультиагентных технологий. Применение мультиагентных технологий для решения задач обеспечения безопасности территориальной техносферы обусловлено многими факторами. В первую очередь, это слож-

ность территориальной техносферы, которая достигла уровня, на котором централизованное управление становится неэффективным из-за наличия больших потоков информации об объектах, входящих в ее состав, и параметрах, их характеризующих, причем большое количество времени тратится на их передачу в центр принятия решений.

Сами мониторинговые системы также становятся все сложнее и включают комплекс подсистем, обладающих различными функциональными характеристиками и взаимодействующих с различными специалистами, удаленными друг от друга. Кроме того, с усложнением падает надежность систем, и все труднее сформулировать их адекватную целевую функцию. Задачи, решаемые такими системами, распределены в пространстве и неоднородны в функциональном плане.

Системы, построенные на основе мультиагентных технологий, относятся к открытым системам, что предполагает наличие развитых возможностей и средств адаптации к изменениям среды, в том числе путем модификации своей структуры и параметров. Возможности мультиагентных технологий при решении этих задач обусловлены не только возможностью оперировать огромными массивами данных, но и системным подходом при их обработке, устойчивостью к случайным искажениям информации (робастностью), возможностью учитывать самые различные данные (элиминация), а также способностью принимать многокритериальные решения.

При выборе вида агентных программ для решения поставленных задач используют два признака: степень развития внутреннего представления агента о внешнем мире и способ принятия агентом решения. Для решения задач обработки результатов комплексного мониторинга и информационного обеспечения техносферной безопасности агенту необходимы способности восприятия текущего состояния объектов территориальной техносферы по совокупности параметров, отслеживания изменения значений этих параметров и состояний объектов территориальной техносферы, накопления множества внутренних состояний, смена которых зависит от истории восприятия, синтезировать информацию о цели, которая описывает желаемое состояние территориальной техносферы и ее объектов.

Структура такого агента, действующего на основе цели, показана на рис. 3. Агент оценивает текущее состояние среды, изменяющееся во времени, по комплексу критериев, фиксируя их динамику в истории восприятия, и на основе имеющейся информации формирует цель или несколько целей, устанавливая для них приоритеты. Агент следит за состоянием среды, а также за множеством целей, которых он пытается достичь, и выбирает действие, направленное на достижение этих целей.

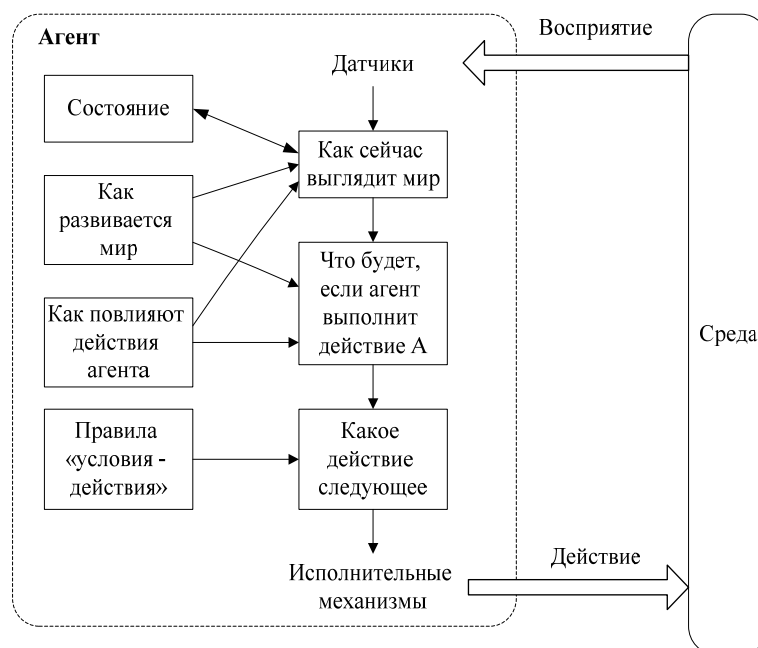


Рис. 3. Структура агента, действующего на основе целей



Обладая накопленным с использованием датчиков множеством состояний среды, агент выбирает действие, направленное на достижение приоритетной цели. Но прежде чем осуществить это действие, он «просчитывает», как оно повлияет на среду и другие цели. И только в случае положительной реакции среды действие будет осуществлено через прописанные исполнительные механизмы.

### Результаты и обсуждение

Территориальная техносфера – это многокомпонентная структура, объединяющая объекты техносферы и процессы, происходящие между ними. В этой системе можно выделить три основных объекта: общество в форме контролирующих органов (органы государственной власти), промышленные предприятия, окружающая среда.

Отношения в территориальной техносфере устроены следующим образом: контролирующий орган воздействует на промышленное предприятие и через него на окружающую среду, промышленное предприятие – только на окружающую среду, окружающая среда – на промышленное предприятие.

В соответствии со структурой территориальной техносферы в мультиагентной системе выделены агент ресурса (для оценки состояния ресурса и идентификации источников воздействия на окружающую среду), агент предприятия (представляет интересы промышленного предприятия) и управляющий агент (оценивает и анализирует ситуацию в целом, разрабатывает рекомендации и подходы к оптимальному управлению, ведет переговоры с агентом предприятия). Структура мультиагентной системы обеспечения экологической безопасности (рис. 4) реализуется через этапы непосредственного сбора информации, ее анализа, идентификации ситуации и подготовки вариантов решений для урегулирования сложившейся ситуации.

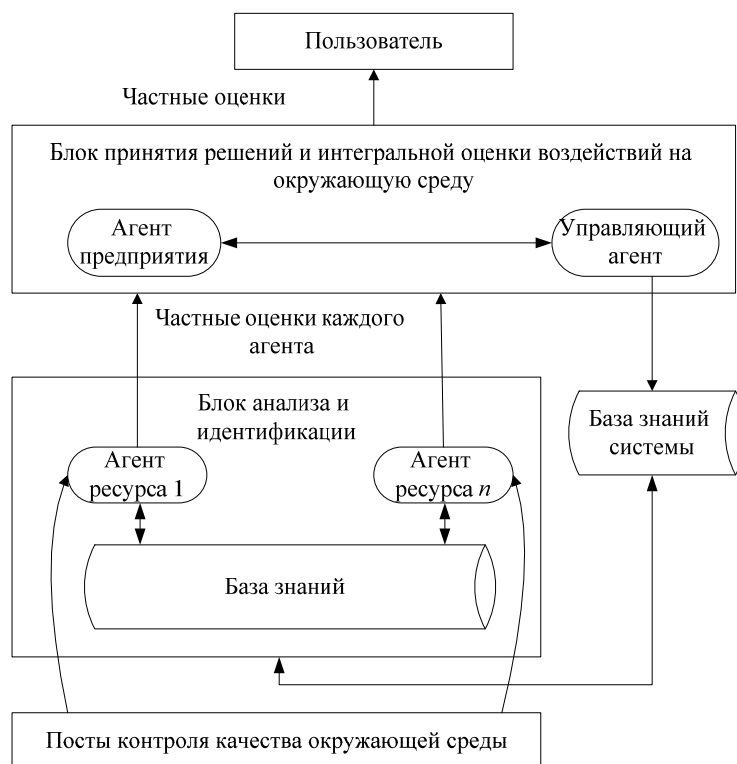


Рис. 4. Структура мультиагентной системы управления техносферной безопасностью

Структура мультиагентной системы управления техносферной безопасностью, приведенная на рис. 4, представляет собой дихотомическую модель принятия решения: ДА или НЕТ. В соответствии с выражением (2) блок принятия решений и интегральной оценки воздействий на окружающую среду выдает пользователю системы комплексного мониторинга территориальной техносферы информацию о превышении уровня допустимых значений любого из поражающих факторов.

При этом каждый агент для достижения сформулированных целей имеет доступ к общей базе знаний (знания о решении поставленных ему задачах), базе данных (информация об окружающей среде) и моделям функционирования. Таким образом, каждый агент имеет возможность узнать, что сделано другими агентами, и скорректировать свои действия для решения общей задачи, действуя на основе своей модели поведения. База данных может содержать, например, информацию об источниках воздействия, характерных для конкретного объекта загрязняющих веществ, их классы опасности, предельно допустимые концентрации, характеристики местности, погодные условия и т.д. Знаниями о решении поставленной задачи являются правила формирования текущего образа объекта территориальной техносферы, подвергающиеся проверке, на основе которой и происходит принятие управленческих решений.

Блок принятия решений и интегральной оценки представляют управляющий агент и агент предприятия. Управляющий агент собирает всю необходимую информацию от агентов ресурса и анализирует ситуацию в целом, дает комплексную оценку состояния территориальной техносферы и принимает управленческие решения. На качественном уровне задача контролирующих органов заключается в выборе на основе поступившей от агента ресурса информации таких условий деятельности предприятий, которые побуждали бы предприятия действовать наиболее выгодным для контролирующих органов образом.

Агент предприятия отстаивает интересы своего предприятия, преследующего свои частные цели, часто расходящиеся с объективно существующими целями устойчивого и безопасного развития территориальной техносферы. По полученной от агента ресурса информации агент предприятия может выявить превышение воздействий на окружающую среду и провести переговоры с управляющим агентом.

Блок анализа и идентификации представлен агентом ресурса, который выполняет функцию обратной связи, оценивая результаты хозяйственной деятельности территориальной техносферы и эффективность задействованных управляющим агентом механизмов управления. Обладая базовыми знаниями об окружающей среде и возможностями «рассуждать», агент собирает информацию о ресурсе, оценивает и анализирует сложившуюся экологическую ситуацию на выделенных ему объектах, определяет источники воздействий и дает локальные оценки. Ресурс в нашем случае можно представить как элемент окружающей среды: атмосферу, гидросферу и литосферу.

### *Заключение*

В статье представлена модель комплексного мониторинга территориальной техносферы, отличительной особенностью которой является мультиагентный подход к управлению безопасностью территориальной техносферы, основанный на использовании больших массивов информации и многокритериальной ее оценки.

Разработанные модели поведения агентов обеспечивают взаимодействие контролирующих органов и предприятий, самостоятельно находят варианты и принимают индивидуальные решения для всех факторов, обладающих множеством персональных особенностей, генерируя предложения по индивидуальным схемам принятия решений.

С функциональной точки зрения модель комплексного мониторинга территориальной техносферы позволяет: прогнозировать результат действия, сравнивать прогноз и результат, принимать стратегию действий и корректировать ее при всевозможных изменениях среды.

### *Список литературы*

1. Molev M. D., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric ARPN // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10, № 16. P. 6787–6792.
2. Bezborodova O. E., Bodin O. N., Polosin V. G. Monitoring of Environmental Safety of the Territorial Technosphere on the Basis of Multi-Agent Technology // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2018. doi:10.1109/fareastcon.2018.8602540
3. Penkova T. G., Korobko A. V., Nicheporchuk V. V., Nozhenkova L. F. On-line modelling and assessment of the state of technosphere and environment objects based on monitoring data // 18th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems – KES2014. 2014. doi:10.1016/j.procs.2014.08.095

4. Bezborodova O. E., Bodin O. N., Polosin V. G. Territorial Technosphere as Managed Dynamic System // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 451. P. 012189. doi:10.1088/1757-899X/451/1/012189
5. Патент 2549222 РФ. МПК G01 W1/00. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха промышленного региона / Бодин О. Н., Казаков В. А. ; № 2013122314/28 ; заявл. 20.11.2014 ; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11.
6. Патент 2536789 РФ. МПК G01W 1/04. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха горнодобывающей промышленности / Пашкевич М. А. [и др.] ; № 2013137519/28 ; заявл. 09.08.2013 ; опубл. 27.12.2014, Бюл. № 36.
7. Патент 2532365 РФ. G01N 33/00, G01W 1/00, G01N 1/22, A01G 15/00. Способ контроля загрязнения природных сред техногенным источником / Девятова А. Ю., Рапуга В. Ф. ; № 2012121866/15 ; заявл. 25.05.2012 ; опубл. 11.10.2014, Бюл. № 31.
8. Патент 2369866 РФ. МПК G01N 33/00. Способ комплексного экологического мониторинга региона / Баринов С. П. [и др.] ; № 2008100341/12 ; 09.01.2008 ; опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28.
9. Psaltis D., Sideris A., Yamamura A. A Multilayered Neural Network Controller // IEEE Control Systems Magazine. 1988. Vol. 8. № 2. P. 17–21.
10. Jouffe L. Fuzzy Inference Systems Learning by Reinforcement Methods // IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics-Part C : Applications and Reviews. 1998. Vol. 28, № 3. P. 338–355.

### References

1. Molev M.D., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric ARP. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(16):6787–6792.
2. Bezborodova O.E., Bodin O.N., Polosin V.G. Monitoring of Environmental Safety of the Territorial Technosphere on the Basis of Multi-Agent Technology. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2018. doi:10.1109/fareastcon.2018.8602540
3. Penkova T.G., Korobko A.V., Nicheporchuk V.V., Nozhenkova L.F. On-line modelling and assessment of the state of technosphere and environment objects based on monitoring data. *18th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems – KES2014*. 2014. doi:10.1016/j.procs.2014.08.095
4. Bezborodova O.E., Bodin O.N., Polosin V.G. Territorial Technosphere as Managed Dynamic System. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451:012189. doi:10.1088/1757-899X/451/1/012189
5. Patent 2549222 Russian Federation. MPK G01 W1/00. *Sistema ekologicheskogo monitoringa atmosfernogo vozdukhа promyshlennogo regiona = Environmental monitoring system of atmospheric air in an industrial region*. Bodin O.N., Kazakov V.A.; № 2013122314/28; appl. 20.11.2014; publ. 20.04.2015, Bull. № 11. (In Russ.)
6. Patent 2536789 Russian Federation. MPK G01W 1/04. *Sistema ekologicheskogo monitoringa atmosfernogo vozdukhа gornodobyvayushchey promyshlennosti = Environmental monitoring system of atmospheric air of the mining industry*. Pashkevich M. A. et al.; № 2013137519/28; appl. 09.08.2013; publ. 27.12.2014, Bull. № 36. (In Russ.)
7. Patent 2532365 Russian Federation. G01N 33/00, G01W 1/00, G01N 1/22, A01G 15/00. *Sposob kontrolya zagryazneniya prirodnykh sred tekhnogennym istochnikom = A method for controlling pollution of natural environments by a technogenic source*. Devyatova A. Yu., Raputa V.F.; № 2012121866/15; appl. 25.05.2012; publ. 11.10.2014, Bull. № 31. (In Russ.)
8. Patent 2369866 Russian Federation. MPK G01N 33/00. *Sposob kompleksnogo ekologicheskogo monitoringa regiona = Method of integrated environmental monitoring of the region*. Barinov S. P. et al. ; № 2008100341/12 ; 09.01.2008; publ. 10.10.2009, Bull. № 28. (In Russ.)
9. Psaltis D., Sideris A., Yamamura A. A Multilayered Neural Network Controller. *IEEE Control Systems Magazine*. 1988;8(2):17–21.
10. Jouffe L. Fuzzy Inference Systems Learning by Reinforcement Methods. *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*. 1998;28(3):338–355.

### 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: oxana243@yandex.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)

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

Поступила в редакцию/Received 27.04.2022

Поступила после рецензирования/Revised 27.05.2022

Принята к публикации/Accepted 24.06.2022

УДК 389.14  
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-3

## ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

В. А. Ефремов<sup>1</sup>, В. И. Мищенко<sup>2</sup>, И. В. Мищенко<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1,2,3</sup> vka@mil.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Для обоснования величины интервала между поверками и расчета показателей эффективности функционирования при использовании по назначению средств измерений (СИ) используются различные модели функционирования в ходе использования по назначению. На основе предложенной полумарковской модели процесса функционирования средств измерений военного назначения обосновано определение периодичности их поверки. Показана актуальность применения теории полумарковских процессов для моделирования функционирования СИ. *Материалы и методы.* Разработана полумарковская модель процесса функционирования СИ, позволяющая комплексно учесть влияние на надежность средств измерений следующих факторов: периодичности поверки СИ, интенсивности использования по назначению, вероятности возникновения неисправности рабочего эталона, вероятности неисправности СИ, вероятности отказа ЗИП, продолжительности проведения поверки, продолжительности диагностирования СИ, продолжительности замены неисправных элементов, вероятностей возникновения ошибок I и II рода. Показателем эффективности функционирования СИ выбран коэффициент готовности средств измерений, являющийся аналогом коэффициента метрологической исправности для СИ. *Результаты и выводы.* С помощью данной модели можно рассчитать величину оптимального интервала между поверками СИ.

**Ключевые слова:** полумарковский процесс, средства измерений, периодичность поверки, процесс функционирования

**Для цитирования:** Ефремов В. А., Мищенко В. И., Мищенко И. В. Полумарковская модель процесса функционирования средств измерений // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 29–38. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-3

## SEMI – MARKOV MODEL OF THE FUNCTIONING PROCESS MEASURING INSTRUMENTS

V.A. Efremov<sup>1</sup>, V.I. Mishchenko<sup>2</sup>, I.V. Mishchenko<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia  
<sup>1,2,3</sup> vka@mil.ru

**Abstract.** *Background.* To substantiate the value of the interval between verifications and to calculate the performance indicators of functioning when measuring instruments (MI) are used for their intended purpose, various models of the functioning of the means during intended use are used. On the basis of the proposed semi-Markov model of the process of functioning of measuring instruments for military purposes, the determination of the frequency of their verification is justified. The relevance of the application of the theory of semi-Markov processes for modeling the functioning of MI is shown. *Materials and methods.* A semi-Markov model of the MI functioning process has been developed, which allows to comprehensively take into account the influence of the following factors on the reliability of measuring instruments: the frequency of MI verification, the intensity of intended use, the probability of a malfunction of the working standard, the probability of a malfunction of the MI, the probability of a failure of the spare parts, the duration of verification, the duration of MI diagnostics, the duration of replacement of faulty elements, the probabilities of errors I and II rhoda. The indicator of the effectiveness of the functioning of the MI is the readiness coefficient of measuring instruments, which is an analogue of the coefficient of metrological serviceability for the MI. *Results and conclusions.* With the help of this model, it is possible to calculate the value of the optimal interval between the verifications of MI.

**Keywords:** semi-Markov process, measuring instruments, verification periodicity, functioning process

**For citation:** Efremov V.A., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V. Semi-Markov model of the functioning process measuring instruments. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):29–38. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-3

Интервалы между поверками (ИМП) являются одной из важных характеристик СИ, поскольку они определяют не только их технические характеристики, но и существенно влияют на боеготовность вооружения. Поэтому требования к ИМП постоянно ужесточаются, что находит свое отражение в технических требованиях на вновь разрабатываемые и модернизируемые СИ. На ранних этапах проектирования для установления ИМП используются расчетные методы, приведенные в РМГ 74-2004. В начале рассчитывается первоначальное значение интервалов между поверками на этапе утверждения типа СИ согласно РМГ 74-2004. В этом документе приведен ряд методик, основанных на использовании показателей метрологической надежности СИ, таких как вероятность того, что в течение заданной наработки метрологический отказ не возникнет или средняя наработка на метрологический отказ, равная математическому ожиданию наработки до первого метрологического отказа. Согласно РМГ 74-2004 аналогом коэффициента метрологической исправности СИ является комплексный показатель надежности СИ – коэффициент готовности, т.е.  $K_{ми} \sim K_{г}$ .

Наступление метрологического отказа может быть обнаружено только при поверке СИ, результаты которой позволят утверждать, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Является очевидным, что существует оптимальная величина ИМП.

Действительно, частые поверки приводят к отрыву СИ от использования их по назначению, подрывают боеготовность вооружения и военной техники (ВВТ). Последнее обусловлено тем, что СИ, часто находясь на поверке, не могут обеспечить контроль и оценку технического состояния ВВТ. Это приводит к снижению коэффициента готовности и коэффициента метрологической исправности.

Редкие поверки приводят к тому, что в СИ накапливаются метрологические отказы, которые могут быть выявлены только при их поверке. И чем реже поверки, тем этих отказов больше. Накопление метрологических отказов приводит к тому, что после поверки СИ отправляются на ремонт. Это опять же приводит к снижению  $K_{ми}$  и  $K_{г}$ . Таким образом, существует оптимальное значение ИМП, обеспечивающее максимум  $K_{ми}$  и  $K_{г}$  и адаптацию значений этих показателей к достигнутому уровню безотказности и метрологической исправности СИ.

Перспективным направлением обоснования величины ИМП является использование моделей функционирования СИ в ходе их применения по назначению, позволяющих рассчитать эффективность этих средств как функцию ИМП. При этом уровень сложности модели определяется не только перечнем учитываемых факторов, но и соответствующим уровнем сложности самого СИ, наличием в последнем разнородных подсистем и элементов.

Для простых СИ моделирование процесса функционирования представляет собой чередование временных промежутков, в которых это средство метрологически исправно и используется по назначению либо в случае метрологического отказа, обнаруженного в ходе поверки, восстанавливается. Такой процесс описывается марковской моделью, граф которой включает два состояния: работоспособное и восстановления.

Граф этой модели представлен на рис. 1.

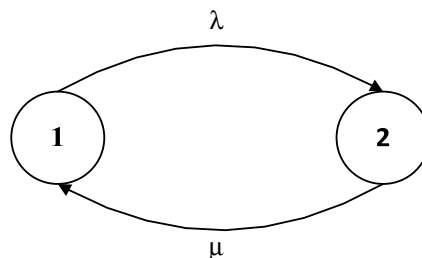


Рис. 1. Граф состояний модели процесса функционирования простых СИ:  
 $\lambda$  и  $\mu$  – интенсивности отказов и восстановлений простых СИ соответственно

Решения системы уравнений Колмогорова для такой модели в стационарном режиме, представленной графом на рис. 1, на этапе нормальной эксплуатации имеют вид

$$P_1 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}; \quad P_2 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda}.$$

Так как  $\lambda = \frac{1}{T_o}$ , а  $\mu = \frac{1}{T_B}$ , то  $P_1 = \frac{1}{T_B \left( \frac{1}{T_o} + \frac{1}{T_B} \right)} = \frac{1}{\frac{T_B}{T_o} + 1} = \frac{T_o}{T_o + T_B} = K_r$ , где  $T_o$  – средняя наработка на отказ;  $T_B$  – среднее время восстановления.

Таким образом, вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии соответствует стандартизованному определению коэффициента готовности. С помощью этого показателя оценивается эффективность использования по назначению простых СИ.

Сложные СИ обладают некоторым уровнем избыточности, позволяющим накапливать соответствующее этому уровню количество отказов элементов, не приводящее к отказу системы в целом. С точки зрения всего средства эти отказы являются неисправностями. Возвращение утраченного уровня избыточности сложного СИ осуществляется в рамках поверки. Процесс функционирования СИ в ходе эксплуатации представляется полумарковской моделью, представленной на рис. 2.

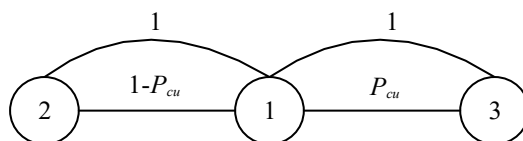


Рис. 2. Граф состояний для модели процесса эксплуатации СИ с избыточностью

Множество состояний графа  $R = \{R_i\}, i=1, \dots, r$  ( $r$  – количество состояний графа, для графа на рис. 2, очевидно,  $r = 3$ ) включает:  $R_1$  – состояние исправности;  $R_2$  – состояние, когда на исправном СИ проводится поверка;  $R_3$  – состояние, когда на неисправном СИ проводится поверка, отыскивается неисправность и после этого средство восстанавливается.

В соответствии с работой [1] полумарковский процесс задается начальным состоянием и двумя матрицами – матрицей переходов вложенной марковской цепи  $W, (W = \{w_{ij}\}, (ij) = 1, \dots, r)$  и матрицей условных функций распределения продолжительности пребывания в состояниях  $F(t), F(t) = \{F_{ij}(t)\}, (i, j) = 1, \dots, r$ .

Для графа, представленного на рис. 2, эти матрицы имеют вид

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1-P_{ci} & P_{ci} \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{matrix} \end{matrix}, \quad F(t) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & F_{12}(t) & F_{13}(t) \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{matrix} F_{21}(t) & 0 & 0 \\ F_{31}(t) & 0 & 0 \end{matrix} \end{matrix}.$$

В матрице  $W$

$$P_{ci} = 1 - \exp(-\lambda_{ci} T_{имп}),$$

где  $P_{ci}$  – вероятность возникновения неисправности СИ;  $\lambda_{ci}$  – интенсивность возникновения метрологических неисправностей;  $T_{имп}$  – интервал между поверками.

Неравные нулю элементы матрицы  $F(t)$  имеют вид

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 0, & t < T_{имп}; \\ 1, & t \geq T_{имп} \end{cases}; \quad F_{13}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \frac{1 - \exp(-\lambda_{ci} t)}{1 - \exp(-\lambda_{ci} T_{имп})}, & 0 < t < T_{имп}, \\ 1, & t \geq T_{имп}; \end{cases}$$

$$F_{21}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{п}, \\ 1, & t \geq T_{п}; \end{cases}; \quad F_{31}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{п} + T_B, \\ 1, & t \geq T_{п} + T_B, \end{cases}$$

где  $T_{п}$  – математическое ожидание продолжительности поверки;  $T_B$  – математическое ожидание продолжительности восстановления СИ.

Стационарное распределение вероятностей состояний полумарковского процесса в соответствии с работой [1] определяется по формуле

$$\pi_i = \frac{P_i m_i}{\sum_{j=1}^3 P_j m_j}, \quad i, j = \overline{1, r}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – стационарная вероятность пребывания вложенной марковской цепи в  $i$ -м состоянии;  $m_i$  – математическое ожидание продолжительности пребывания СИ в  $i$ -м состоянии.

Стационарное распределение вероятностей пребывания вложенной марковской цепи в состояниях  $P = (P_1, P_2, P_3)$  отыскивается в результате решения системы уравнений, записанной в матричном виде и удовлетворяющее условию нормировки

$$\overline{P} = \overline{PW}, \quad \sum_{j=1}^r P_j = 1, \quad 0 \leq P_j \leq 1, \quad j = \overline{1, r}. \quad (2)$$

Решение этой системы уравнений имеет вид

$$P_1 = \frac{1}{2}; \quad P_2 = \frac{1 - P_{\text{сн}}}{2}; \quad P_3 = \frac{P_{\text{сн}}}{2}.$$

Математические ожидания пребывания в состояниях определяются по традиционной формуле [1]

$$m_i = \int_0^{\infty} [1 - F_i(t)] dt, \quad i = \overline{1, r}, \quad (3)$$

здесь  $F_i(t)$  – безусловные функции распределения вероятностей ухода процесса из соответствующих состояний, отыскиваемые в соответствии с [1] по формуле

$$F_i(t) = \sum_{j=1}^3 F_{ij}(t) w_{ij}, \quad (i, j) = \overline{1, r},$$

где  $F_{ij}(t)$  – элементы матрицы  $F(t)$ ;  $w_{ij}$  – элементы матрицы  $W$ .

Тогда средние времена пребывания полумарковского процесса в состояниях  $F_i(t)$  определяются как

$$m_1 = \frac{1}{\lambda_{\text{сн}}} [1 - \exp(-\lambda_{\text{сн}} T_{\text{имп}})]; \quad m_2 = T_{\text{п}}; \quad m_3 = T_{\text{п}} + T_{\text{в}}.$$

Таким образом, показателем эффективности функционирования СИ в процессе использования по назначению будет вероятность застать полумарковский процесс и, следовательно, объект исследования в исправном состоянии  $R_1$  в произвольный момент времени, т.е.

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\lambda_{\text{сн}}} [1 - \exp(-\lambda_{\text{сн}} T_{\text{имп}})]}{\frac{1}{\lambda_{\text{сн}}} [1 - \exp(-\lambda_{\text{сн}} T_{\text{имп}})] + T_{\text{п}} + [1 - \exp(-\lambda_{\text{сн}} T_{\text{имп}})] T_{\text{в}}}. \quad (4)$$

Представленное выражение является аналогом коэффициента технического использования, приведенного в ГОСТ 27.002–2015. Как видно из формулы (4), приведенная модель учитывает безотказность объекта исследования  $\lambda_{\text{сн}}$ , продолжительность проверки  $T_{\text{п}}$ , величину межповерочного интервала  $T_{\text{имп}}$  и продолжительность восстановления  $T_{\text{в}}$ . Недостатком модели является отсутствие учета качества проверки, которое определяется достоверностью контроля технического состояния СИ, проводимого в ходе проверки.

Исследованиям процессов использования по назначению сложных технических систем посвящены работы профессоров Ю. К. Беляева, А. Д. Соловьева, Е. Ю. Барзиловича, В. А. Каштанова, А. В. Смагина, Л. И. Волкова, Е. И. Сычева, В. И. Мищенко и др.

Среди них по совокупности учитываемых факторов выделяются именно полумарковские модели, разработанные профессорами В. И. Мищенко, Е. И. Сычева и Л. И. Волкова [2–4].

Как показывает анализ моделей процесса функционирования технических систем [2, 3, 5–7], наиболее адекватной с точки зрения учета влияния достоверности контроля параметров



при поверке СИ является модель, предложенная профессором В. И. Мищенко [2]. Эта модель взята в качестве базовой. Ее суть заключается в том, что контроль пригодности СИ, проводимый в рамках поверки, сводится к измерению, как правило, некоторого постоянного набора независимых параметров. По результатам контроля принимается решение об отнесении состояния объекта к пригодному или непригодному. Обнаружение метрологических неисправностей, обусловивших непригодность, осуществляется только при проведении поверки. Периодичность поверки образца СИ определяется как продолжительность временного промежутка  $T_{\text{имп}}$ , по истечении которого СИ поверяется в течение случайного времени  $\tau_n$ , ограниченного сверху временем  $T_{\text{п}}$ , т.е.  $\tau_n \leq T_{\text{п}}$ . Своевременная поверка средств измерений обеспечивает требуемый уровень их пригодности к использованию по назначению. Чем выше уровень сложности СИ (соответственно, уровень избыточности), тем критичнее становятся принятые решения о годности СИ к достоверности полученных результатов. При этом большое значение приобретает метрологическая исправность рабочего эталона. Поэтому при разработке модели процесса функционирования СИ при использовании по назначению необходимо учитывать возможность снижения достоверности показаний СИ в случае метрологического отказа рабочего эталона при проведении поверки СИ. Таким образом, при использовании СИ по назначению могут возникнуть следующие ситуации:

1. Перед началом проведения поверки СИ с вероятностью  $1 - P_{\text{СИ}}(T_{\text{имп}})$  пригодно к использованию по назначению, рабочий эталон с вероятностью  $1 - P_{\text{Э}}(T_{\text{п}})$  пригоден к использованию по назначению. В результате проведения поверки СИ в течение ограниченного сверху времени  $\tau_n \leq T_{\text{п}}$  поверитель может принять следующие решения:

а) СИ пригодно (правильное решение) – с вероятностью  $1 - \alpha_1$ . После проведения поверки СИ продолжает применяться по назначению до следующей поверки;

б) СИ непригодно (ошибочное решение, соответствующее ложной регистрации метрологической неисправности СИ, т.е. ошибке первого рода) с вероятностью  $F_1(t)$ . Причем эта ошибка обусловлена в первую очередь ограниченной метрологической надежностью эталона. В этом случае проводится дополнительная поверка, позволяющая выявить достоверно отсутствие метрологического отказа. Проведение дополнительной поверки проводится в течение ограниченного сверху времени  $\tau_{\text{дп}} \leq T_{\text{дп}}$ .

2. До проведения поверки СИ с вероятностью  $1 - P_{\text{СИ}}(T_{\text{имп}})$  пригодно к использованию по назначению, рабочий эталон с вероятностью  $P_{\text{Э}}(T_{\text{п}})$  отказал. В зависимости от исхода поверки, а также характера метрологического отказа рабочего эталона (частичного или полного) по результатам поверки СИ могут быть произведены следующие оценки его состояния:

а) СИ непригодно (ложный метрологический отказ) – с вероятностью  $F_2$ . В этой ситуации проводится дополнительная поверка;

б) СИ пригодно – с вероятностью  $1 - \alpha_2$ .

3. До начала проведения поверки СИ с вероятностью  $P_{\text{СИ}}(T_{\text{имп}})$  оказалось непригодным, рабочий эталон с вероятностью  $1 - P_{\text{Э}}(T_{\text{п}})$  пригоден к использованию по назначению. В результате проведения поверки о состоянии СИ могут быть приняты следующие решения:

а) СИ непригодно (правильное решение) – с вероятностью  $1 - \beta_1$ . После обнаружения метрологического отказа СИ проходит дополнительную поверку в течение времени  $\tau_{\text{дп}} \leq T_{\text{дп}}$ .

Затем, в случае наличия отказавшего элемента в ЗИП, с вероятностью  $1 - P_{\text{ЗИП}}$ , проводится замена этого элемента на работоспособный за время  $t_3 \leq T_3$  (временем поиска в комплекте ЗИП пренебрегается). Если же требуемый элемент, с вероятностью  $P_{\text{ЗИП}}$ , отсутствует и в комплекте ЗИП, тогда оформляется заявка на предприятие-изготовитель, которая удовлетворяется в течение случайного времени экстренной поставки  $t_{\text{эд}} \leq T_{\text{ЭП}}$  и после замены и проведения поверки продолжает использоваться по назначению;

б) СИ пригоден (пропуск отказа) – с вероятностью  $\beta_2$ . В этом случае СИ продолжает использоваться по назначению с метрологическим отказом, снижающим эффективность функционирования СИ при использовании по назначению, до следующей поверки.

4. К началу проведения поверки СИ с вероятностью  $P_{\text{СИ}}(T_{\text{имп}})$  непригодно, рабочий эталон с вероятностью  $P_{\text{Э}}(T_{\text{П}})$  неисправен. В зависимости от результатов поверки и характера отказа рабочего эталона производится следующая оценка состояния СИ:

а) СИ непригодно – с вероятностью  $1-\beta_2$ , после чего проводится дополнительная проверка и замена отказавшего элемента с использованием комплектов ЗИП, описанным в п. 3а;

б) СИ пригодно (пропуск отказа) – с вероятностью  $\beta_2$ , что приводит к ситуации, описанной в п. 3б.

Граф, соответствующий этой модели, представлен на рис. 3. Предложенная модель процесса функционирования СИ учитывает основные факторы, влияющие на это функционирование, и позволяет определять основные показатели эффективности функционирования СИ при использовании по назначению.

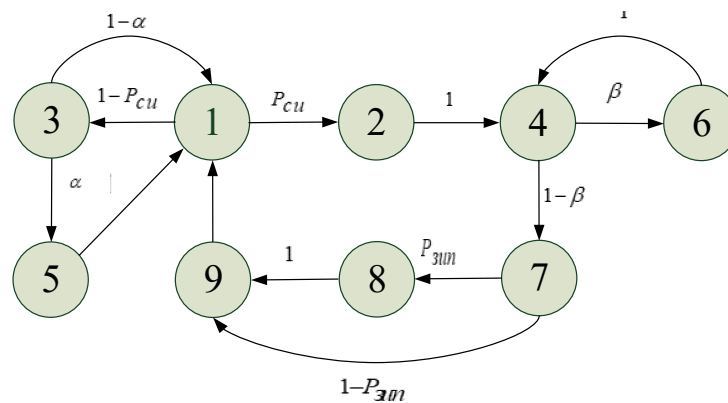


Рис. 3. Граф полумарковской модели процесса функционирования при использовании по назначению СИ

Множество возможных состояний  $R = \{1, 2, \dots, r\}$  включает 9 состояний (т.е.  $r = 9$ ):  $R_1$  – СИ пригодно и используется по назначению (исходное состояние полумарковского процесса);  $R_2$  – СИ непригодно и функционирует с неисправностью, обусловившей непригодность, до начала поверки;  $R_3$  – СИ поверяется при условии, что оно к началу проведения поверки было пригодно;  $R_4$  – СИ поверяется при условии, что оно к началу проведения поверки было непригодно;  $R_5$  – СИ проходит дополнительную проверку при условии ложной регистрации пригодности;  $R_6$  – СИ используется по назначению с неисправностью, обусловившей заключение о непригодности, до очередной поверки;  $R_7$  – СИ проходит дополнительную проверку, подтверждающую его неисправность, и восстанавливается;  $R_8$  – СИ ожидает экстренной поставки элемента, отсутствующего в комплекте ЗИП;  $R_9$  – СИ восстанавливается, производится замена отказавшего элемента из состава ЗИП, после чего производится повторная поверка, подтверждающая его исправность и используется по назначению.

Матрица  $W$  переходных вероятностей вложенной марковской цепи имеет вид

$$W = \begin{pmatrix} 0 & P_{\text{СИ}} & (1-P_{\text{СИ}}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 1-\beta & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{\text{ЗИП}} & (1-P_{\text{ЗИП}}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\alpha = \alpha_1(1 - P_3) + \alpha_2 P_3; \quad \beta = F_1(1 - P_3) + \beta_2 P_3,$$

где  $\alpha, \beta$  – вероятности возникновения ошибок контроля I и II рода;  $P_3$  – вероятность возникновения метрологического отказа рабочего эталона.

Для нормального этапа процесса функционирования СИ интенсивности отказов элементов считаются константами и тогда вероятность возникновения метрологического отказа СИ в течение периода между поверками  $P_{СИ}$  определится по традиционной формуле

$$P_{СИ} = P_{СИ}(T_{имп}) = 1 - \exp(-\lambda_{СИ} T_{имп}), \quad (5)$$

где  $P_{СИ}(T_{имп})$  – вероятность возникновения неисправности, обусловившей непригодность СИ, на интервале  $[0, T_{имп}]$ ;  $\lambda_{СИ}$  – интенсивность метрологических отказов СИ.

В матрице W указана также вероятность  $P_{зип}$ , которая соответствует вероятности отказа ЗИП, т.е. вероятности того, что после обнаружения отказа и обращении к ЗИП требуемый элемент в ЗИП будет отсутствовать. Эта вероятность рассчитывается по традиционным методикам, приведенным в ГОСТ РВ 27.3.03–2005.

Ненулевые элементы матрицы  $F(t)$  определяются с учетом особенностей обеспечения адекватности математического представления реального процесса и представлены ниже

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ \frac{1 - e^{-\lambda_{СИ} t}}{1 - e^{-\lambda_{СИ} T_{имп}}}, & 0 < t < T_{имп}, \\ 1, & t \geq T_{имп}; \end{cases}$$

$$F_{13}(t) = F_{64}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{имп}, \\ 1, & t \geq T_{имп}; \end{cases} \quad F_{24}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ \frac{e^{-\lambda_{СИ} T_{имп}} (e^{\lambda_{СИ} t} - 1)}{1 - e^{-\lambda_{СИ} T_{имп}}}, & 0 < t < T_{имп}, \\ 1, & t \geq T_{имп}; \end{cases}$$

$$F_{31}(t) = F_{35}(t) = F_{46}(t) = F_{47}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{II}, \\ 1, & t \geq T_{II}; \end{cases} \quad F_{51}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{ДII}, \\ 1, & t \geq T_{ДII}; \end{cases}$$

$$F_{78}(t) = F_{79}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{Д}, \\ 1, & t \geq T_{Д}; \end{cases} \quad F_{89}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{ЭД}, \\ 1, & t \geq T_{ЭД}; \end{cases} \quad F_{91}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{3AM} + T_{II}, \\ 1, & t \geq T_{3AM} + T_{II}. \end{cases}$$

В представленных формулах обозначены:  $T_{имп}$  – периодичность поверки СИ;  $T_{II}$  – продолжительность проведения поверки СИ;  $T_{ДII}$  – продолжительность повторной проверки в случае ошибки 1-го рода;  $T_{Д}$  – продолжительность диагностирования СИ;  $T_{ЭД}$  – экстренная доставка исправного элемента;  $T_{3AM}$  – продолжительность замены неисправных элементов.

В соответствии с формулами (1)–(3) были получены соответствующие параметры полумарковского процесса:

– стационарные вероятности вложенной марковской цепи – набор  $(P_1, P_2, \dots, P_9)$ :

$$P_1 = \frac{1}{2(1 + \frac{P_{СИ}}{D}) + F(1 - P_{СИ}) + P_{СИ}(1 - P_{зип})}; \quad P_2 = \frac{P_{СИ}}{2(1 + \frac{P_{СИ}}{D}) + F(1 - P_{СИ}) + P_{СИ}(1 - P_{зип})};$$

$$P_3 = \frac{1 - P_{СИ}}{2(1 + \frac{P_{СИ}}{D}) + F(1 - P_{СИ}) + P_{СИ}(1 - P_{зип})}; \quad P_4 = \frac{P_{СИ}}{D \left[ 2(1 + \frac{P_{СИ}}{D}) + F(1 - P_{СИ}) + P_{СИ}(1 - P_{зип}) \right]};$$

$$P_5 = \frac{F(1-P_{\text{си}})}{2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})}; P_6 = \frac{P_{\text{си}}(1-D)}{D\left[2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})\right]};$$

$$P_7 = \frac{P_{\text{си}}}{2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})}; P_8 = \frac{P_{\text{си}}P_{\text{зип}}}{2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})};$$

$$P_9 = \frac{P_{\text{си}}}{2(1+\frac{P_{\text{си}}}{D})+F(1-P_{\text{си}})+P_{\text{си}}(1-P_{\text{зип}})};$$

– математические ожидания продолжительности пребывания в состояниях  $F_i(t)$  – набор  $(m_1, m_2, \dots, m_9)$ :

$$m_1 = \frac{1}{\lambda_{\text{си}}}P_{\text{си}}; m_2 = \frac{1}{P_{\text{си}}}(T_{\text{имп}} - m_1); m_3 = m_4 = T_{\text{п}};$$

$$m_5 = T_{\text{дп}}; m_6 = T_{\text{имп}}; m_7 = T_{\text{д}}; m_8 = T_{\text{эд}}; m_9 = T_{\text{зам}}.$$

Распределение вероятностей состояний полумарковского процесса – набор  $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_9)$ :

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\lambda_{\text{си}}}P_{\text{си}}}{(T_{\text{имп}} + T_{\text{п}})\left(1 - P_{\text{си}} + \frac{P_{\text{си}}}{D}\right) + T_{\text{дп}}F(1 - P_{\text{си}}) + P_{\text{си}}(T_{\text{д}} + T_{\text{зам}} + T_{\text{п}} + P_{\text{зип}}T_{\text{эд}})} = \frac{P_{\text{си}}}{\lambda_{\text{си}}Q};$$

$$\pi_2 = \frac{\lambda_{\text{си}}T_{\text{имп}} - P_{\text{си}}}{\lambda_{\text{си}}Q}; \pi_3 = \frac{T_{\text{п}}(1 - P_{\text{си}})}{Q}; \pi_4 = \frac{P_{\text{си}}T_{\text{п}}}{DQ}; \pi_5 = \frac{T_{\text{дп}}F(1 - P_{\text{си}})}{Q};$$

$$\pi_6 = \frac{P_{\text{си}}(1 - D)T_{\text{имп}}}{DQ}; \pi_7 = \frac{P_{\text{си}}T_{\text{д}}}{Q}; \pi_8 = \frac{P_{\text{си}}P_{\text{зип}}T_{\text{эд}}}{Q}; \pi_9 = \frac{P_{\text{си}}(T_{\text{зам}}T_{\text{п}})}{Q}.$$

Здесь  $\pi_1$  соответствует вероятности застать объект поверки, т.е. СИ в состоянии пригодности в произвольный момент времени, т.е. коэффициенту готовности. Но теперь этот коэффициент явно зависит от интенсивности метрологических отказов, обусловивших непригодность, величины межповерочного интервала, продолжительности поверки, ошибок первого и второго родов и продолжительностей диагностирования, замены и экстренной доставки.

### Заключение

Представленная в данной статье полумарковская модель процесса функционирования СИ позволяет комплексно учесть влияние на надежность средств измерений различных факторов: периодичности поверки СИ, интенсивности использования по назначению, вероятности возникновения неисправности рабочего эталона, вероятности неисправности СИ, вероятности отказа ЗИП, продолжительности проведения поверки, продолжительности диагностирования СИ, продолжительности замены неисправных элементов, вероятностей возникновения ошибок I и II рода. С помощью данной модели можно рассчитать величину оптимального интервала между поверками СИ.

### Список литературы

1. Харламов Б. П. Непрерывные полумарковские процессы. СПб. : Наука, 2001. 431 с.
2. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника-сервис, 2016. 218 с.
3. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : Татьяна день, 1993. 274 с.

4. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М. : Высш. шк., 1981. 368 с.
5. Новиков А. Н., Кравцов А. Н., Ширямов О. А. Математическая модель прогнозирования изменения значения критической составляющей погрешности рабочего эталона единицы величины с учетом априорной информации // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2018. Вып. 664. С. 102–109.
6. Новиков А. Н. Алгоритм индивидуального прогнозирования предельных экономически целесообразных сроков эксплуатации измерительных комплексов // Вестник СибГУТИ. 2016. № 4. С. 19–24.
7. Мищенко В. И., Кравцов А. Н., Мамлеев Т. Ф. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учетом периодичности поверки // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 22–27.

### References

1. Kharlamov B.P. *Neprevyvnnye polumarkovskie protsessy = Continuous semi-Markov processes*. Saint Petersburg: Nauka, 2001:431. (In Russ.)
2. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh system = Problems of operation of complex technical systems*. Saint Petersburg: Politehnika-servis, 2016:218. (In Russ.)
3. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury = Metrological support of electronic equipment*. Moscow: Tat'yanin den', 1993:274. (In Russ.)
4. Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiey letatel'nykh kompleksov = Management of the operation of aircraft complexes*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:368. (In Russ.)
5. Novikov A.N., Kravtsov A.N., Shiryamov O.A. Mathematical model of forecasting changes in the value of the critical component of the error of the working standard of the unit of magnitude taking into account a priori information. *Trudy Voенно-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhaiskogo = Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*. 2018;(664):102–109. (In Russ.)
6. Novikov A.N. Algorithm of individual forecasting of marginal economically expedient-different service life of measuring complexes. *Vestnik SibGUTI = Bulletin of SibSUTI*. 2016;(4):19–24. (In Russ.)
7. Mishchenko V.I., Kravtsov A.N., Mamleev T.F. Semi-Markov model of functioning of redundant measuring instruments taking into account the frequency of verification. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2021;(4):22–27. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Валерий Александрович Ефремов

адъюнкт,  
кафедра метрологического обеспечения  
вооружения военной и специальной техники,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

#### Valeriy A. Efremov

Adjunct,  
sub-department of metrological support  
of weapons, military and special equipment,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

#### Владимир Ильич Мищенко

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры метрологического  
обеспечения вооружения военной  
и специальной техники,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

#### Vladimir I. Mishchenko

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of metrological  
support of weapons, military and special equipment,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

#### Илья Владимирович Мищенко

кандидат технических наук,  
старший преподаватель –  
начальник метрологической службы,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

#### Ilya V. Mishchenko

Candidate of technical sciences,  
senior lecturer – head of the metrological service,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 05.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 06.06.2022

Принята к публикации/Accepted 11.07.2021

## СИНТЕЗ И КОРРЕКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ИЗЛУЧЕНИЯ-ПРИЕМА. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

С. И. Коновалов<sup>1</sup>, Р. С. Коновалов<sup>2</sup>, В. М. Цаплев<sup>3</sup>,  
З. М. Юлдашев<sup>4</sup>, Д. И. Нефедьев<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

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

<sup>1</sup> sikonovalov.eut@gmail.com, <sup>2</sup> rskonovalov.eut@gmail.com,

<sup>3</sup> valery@convergences-fr.ru, <sup>4</sup> yuld@mail.ru, <sup>5</sup> iit@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматриваются вопросы синтеза и коррекции входных и выходных электрических и акустических сигналов в системах излучения-приема, предназначенных для акустического неразрушающего контроля. Целью работы является формализация и алгоритмизация процесса и принципов разработки новых и совершенствовании уже существующих систем акустического неразрушающего контроля, основанных на синтезе и коррекции акустических сигналов в системах излучения-приема. *Материалы и методы.* Представлен подход, основанный на двух видах коррекции сигналов в системе излучения-приема: конструктивная коррекция и коррекция входных электрических сигналов. Новизна подхода заключается в алгоритме выбора конкретного алгоритма коррекции, наилучшим образом соответствующего задачам разработчиков пьезоэлектрических преобразователей, что позволяет добиваться создания систем излучения-приема с заранее заданными параметрами акустических сигналов. *Результаты.* Представлена обобщенная структурная схема, описывающая алгоритм расчета и проектирования пьезоэлектрических преобразователей. Данная статья является первой в цикле работ, посвященных синтезу и коррекции входных и выходных электрических и акустических сигналов в системах излучения-приема. В последующих частях будет раскрыта и подтверждена правомерность применения коррекции акустических сигналов.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический преобразователь, акустический зондирующий импульс, коррекция и синтез сигналов

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-20014) и Санкт-Петербургского научного фонда (соглашение № 16/2022 от 14.04.2022).

**Для цитирования:** Коновалов С. И., Коновалов Р. С., Цаплев В. М., Юлдашев З. М., Нефедьев Д. И. Синтез и коррекция акустических сигналов в системах излучения-приема. Алгоритм расчета и проектирования // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 39–46. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-4

## SYNTHESIS AND CORRECTION OF ACOUSTIC SIGNALS IN RADIATION-RECEPTION SYSTEMS. CALCULATION AND DESIGN ALGORITHM

S.I. Konovalov<sup>1</sup>, R.S. Konovalov<sup>2</sup>, V.M. Tsaplev<sup>3</sup>, Z.M. Yuldashev<sup>4</sup>, D.I. Nefed'ev<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> St. Petersburg, Russia Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg, Russia State Transport, St. Petersburg, Russia

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

<sup>1</sup> sikonovalov.eut@gmail.com, <sup>2</sup> rskonovalov.eut@gmail.com,

<sup>3</sup> valery@convergences-fr.ru, <sup>4</sup> yuld@mail.ru, <sup>5</sup> iit@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* The issues of synthesis and correction of input and output electrical and acoustic signals in radiation-reception systems intended for acoustic non-destructive testing are considered. The aim of the work is to formalize and algorithmize the process and principles of developing new and improving existing acoustic non-destructive testing systems based on the synthesis and correction of acoustic signals in emission-reception systems. *Materials and methods.* An approach based on two types of signal correction in the emission-reception system is presented: constructive correction and correction of input electrical signals. The novelty of the approach lies in the algorithm for choosing a specific correction algorithm that best suits the tasks of developers of piezoelectric transducers, which makes it possible to achieve the creation of emission-reception systems with predetermined parameters of acoustic signals. *Results.* A generalized block diagram is presented that describes the algorithm for calculating and designing of piezoelectric transducers. This article is the first in a series of works devoted to the synthesis and correction of input and output electrical and acoustic signals in radiation-reception systems. In the following parts, the legitimacy of applying the correction of acoustic signals will be disclosed and confirmed.

**Keywords:** piezoelectric transducer, acoustic probing pulse, signal correction and synthesis

**Acknowledgments:** the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 22-22-20014) and the St. Petersburg Science Foundation (Agreement No. 16/2022 of 04/14/2022).

**For citation:** Konovalov S.I., Konovalov R.S., Tsaplev V.M., Yuldashev Z.M., Nefed'ev D.I. Synthesis and correction of acoustic signals in radiation-reception systems. Calculation and design algorithm. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):39–46. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-4

### Введение

В настоящее время доля ультразвукового контроля (УЗК) среди других методов неразрушающего контроля (НК) достигает 70–80 % [1]. Этим обусловлен постоянно растущий интерес разработчиков аппаратуры НК к совершенствованию ее метрологических характеристик, что влечет за собой повышение достоверности результатов акустического метода НК. Тем самым задача разработчиков является комплексной, включающей в себя необходимость улучшения как работы отдельных элементов электроакустического тракта, так и всей системы «генератор-излучатель-среда-приемник-система обработки сигнала» в целом. Решение этой непростой задачи базируется не только на совершенствовании конструктивных элементов системы, но и на согласовании элементов между собой, синтезировании входных и выходных электрических и акустических сигналов, анализе физических полей излучателя, приемника и др. Понятие «синтез» описывает последовательность действий, позволяющую получить сигнал с заранее заданными свойствами, на основе анализа свойств систем излучения-приема.

Конечной целью, к которой стремятся разработчики аппаратуры акустического контроля, предназначенной для решения задач локационного характера, является улучшение ее характеристик (протяженность мертвой зоны, лучевая и фронтальная разрешающие способности, точность определения координат дефектов). Это возможно не только за счет применения средств обработки сигнала, но и за счет улучшения свойств чувствительных элементов. Широкое распространение в качестве чувствительных элементов систем излучения-приема получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Это обусловлено их более высокой чувствительностью по сравнению с преобразователями других типов [1–8]. Поэтому в работе рассматриваются ПЭП. При этом ПЭП работают в импульсном режиме, т.е. излучаемый сигнал не превышает нескольких полупериодов на рабочей частоте пьезопластины. Это обязательное условие, поскольку длительность излучаемого импульса определяет лучевую и фронтальную разрешающие способности аппаратуры акустического контроля, протяженность мертвой зоны, точность определения координат дефектов.

Целью данной работы является формализация и алгоритмизация процесса и принципов разработки новых и совершенствование уже существующих систем акустического НК, основанных на синтезе входных и выходных электрических и акустических сигналов в системах излучения-приема.



*Коррекция сигналов в системах УЗК*

Существующие и вновь проектируемые системы УЗК с целью создания высокого разрешения к дефектам могут строиться на использовании двух подходов [9]:

- внесение конструктивных изменений в чувствительный элемент (ПЭП);
- формирование генератором системы УЗК электрических сигналов специальной формы.

Рассмотрим типовую схему построения одного из каналов системы УЗК (рис. 1). Импульсный генератор (ИГ) формирует импульс электрического возбуждения, который через широкополосный усилитель (У) и блок электрического согласования (БЭС) подается на пьезоэлектрический преобразователь. Акустический сигнал, излученный ПЭП в среду, принимается приемным ПЭП. Пройдя через блок электрического согласования с широкополосным усилителем, этот сигнал поступает на индикатор, например, электронно-лучевую трубку, ЖК-дисплей и т.д. Описанный алгоритм представляет собой пример классической приемно-излучающей системы.

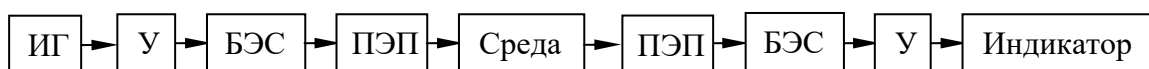


Рис. 1. Типовая схема построения одного из каналов системы УЗК:

ИГ – импульсный генератор; У – широкополосный усилитель;  
БЭС – блок электрического согласования; ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь

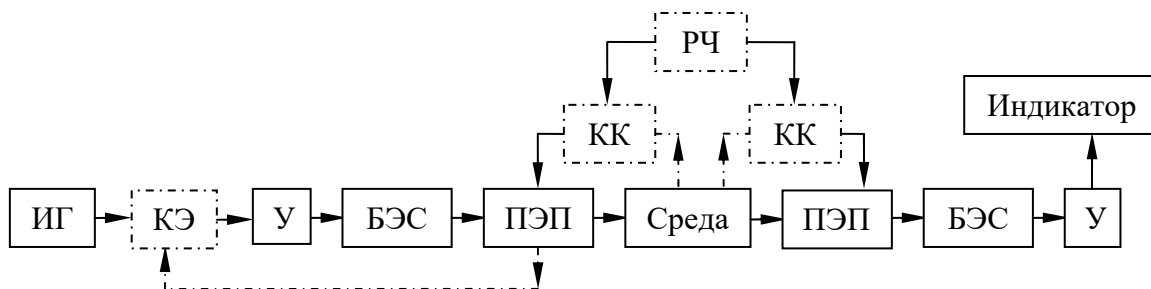


Рис. 2. Типовая схема построения одного из каналов системы УЗК высокого разрешения:

ИГ – импульсный генератор; У – широкополосный усилитель;  
БЭС – блок электрического согласования; ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь;  
КК – корректор конструктивных параметров ПЭП; КЭ – корректор электрических сигналов, возбуждающих ПЭП; РЧ – разнос рабочих частот излучающего и приемного ПЭП

Для построения системы УЗК высокого разрешения требуется разработка алгоритмов коррекции конструктивных параметров ПЭП и электрических сигналов, возбуждающих ПЭП. Данные алгоритмы носят характер виртуальных блоков (КК и КЭ) в структурной схеме УЗК высокого разрешения (рис. 2) и подразумевают программно-аппаратное обеспечение, требующееся для внесения в ИГ и ПЭП. При этом учет влияния среды на излучающий и приемный ПЭПы, а также возбуждаемый импульсным генератором (ИГ) сигнал, подаваемый на ПЭП, описаны в схеме с помощью обратных связей.

Реализация подходов к конструированию ПЭП должна проводиться с учетом их конструктивных особенностей, а также методов возбуждения излучающих преобразователей и обработки данных приемных преобразователей. На рис. 3 приведена обобщенная схема системы излучения-приема, учитывающая алгоритмы коррекции конструктивных параметров ПЭП и электрических сигналов, возбуждающих ПЭП. Данная схема раскрывает сущность базовых принципов и концепций построения импульсных ПЭП и систем излучения-приема на их основе. При этом методология проектирования импульсных пьезоэлектрических преобразователей ультразвуковых дефектоскопов с заранее заданными параметрами излучаемого акустического сигнала требует анализа существующих и разработки новых моделей расчета импульсных многослойных ПЭП, методов и методик коррекции сигналов. Их описанию будут

посвящены будущие работы авторов. В данной работе остановимся на алгоритме расчета и проектирования ПЭП, учитывающем алгоритмы КК и КЭ.

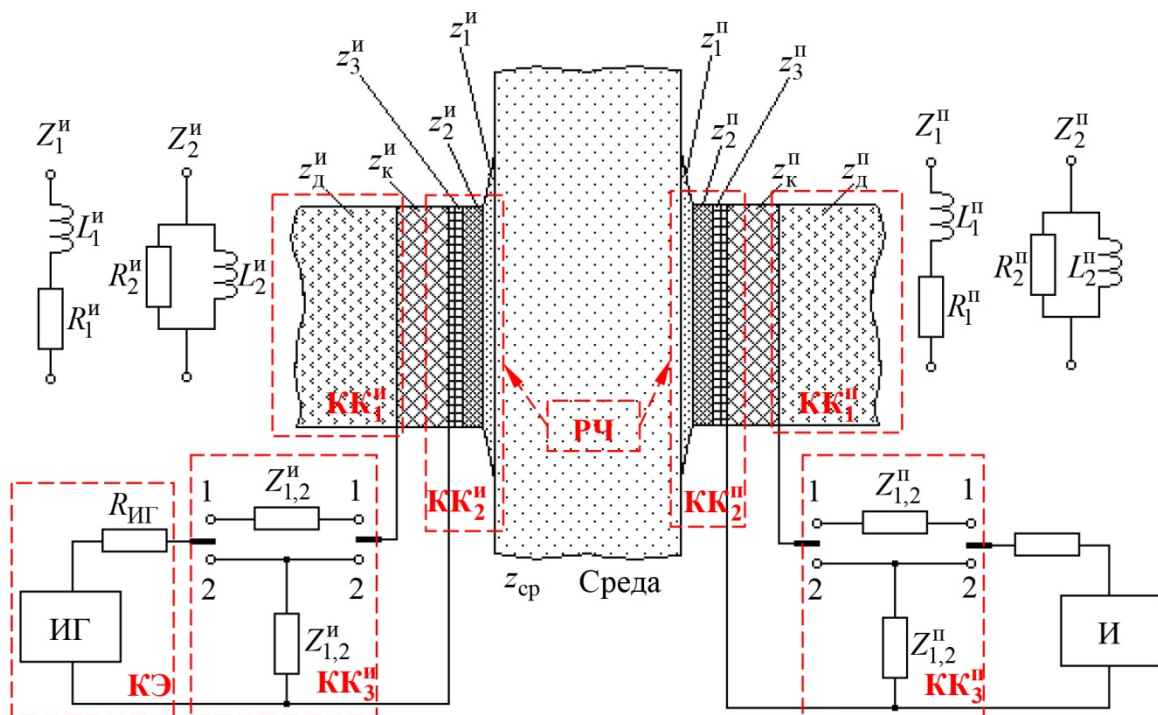


Рис. 3. Обобщенная схема системы излучения-приема, учитывающая алгоритмы коррекции конструктивных параметров ПЭП и электрических сигналов, возбуждающих ПЭП:  $КК_{1,2,3}^{и,п}$  – корректор конструктивных параметров излучающего (и) и приемного (п) ПЭП на основе демпфирования (1), согласующих слоев (2) и корректирующих электрических цепей (3); КЭ – корректор электрических сигналов, возбуждающих ПЭП; РЧ – разнос рабочих частот излучающего (и) и приемного (п) ПЭП; ИГ – импульсный генератор; И – индикатор;  $z_{д,к,1,2,3}^{и,п}$  – удельные акустические сопротивления элементов излучающего (и) и приемного (п) ПЭП (д – демпфер, к – активный материал; 1, 2, 3 – переходные слои);  $L_{1,2}^{и,п}$ ,  $R_{1,2}^{и,п}$ ,  $Z_{1,2}^{и,п}$  – индуктивность, активное сопротивление и полное сопротивление, подключаемых к излучателю (и) и приемнику (п) электрических корректирующих цепей различного типа подключения;  $R_{ИГ}$  – внутреннее сопротивление ИГ

### Алгоритм расчета и проектирования ПЭП

Подходы разработчиков ПЭП к их проектированию могут строиться на различных принципах, опирающихся на общетехнические, конструктивные, технологические и другие особенности разрабатываемых ПЭП. При этом требования технического задания (ТЗ) на разработку ПЭП в проектировании первично. Для уже изготовленных ПЭП в случае, при котором они не удовлетворяют требованиям заказчика и/или ТЗ, возникает необходимость отбраковки или при возможности внесения корректировки в режимы их работы. Данные корректировки (поскольку ПЭП уже изготовлен) не могут опираться на конструктивные или технологические изменения в нем, а исключительно на режимы его возбуждения-приема.

В общем плане требования ТЗ и/или заказчика подразумевают необходимость поиска критерия, позволяющего определить оптимум между формой сигнала, излучаемого ПЭП, и его длительностью, который находится из импульсной характеристики ПЭП по ГОСТ Р 55808–2013<sup>1</sup>. В данном исследовании указанный критерий состоит в поиске оптимума между максимумом амплитуды зондирующего импульса и минимумом его длительности. Эти требования противоречат друг другу с физической точки зрения. Изложенное обстоятельство

<sup>1</sup> ГОСТ Р 55808–2013. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний.

предопределило необходимость создания алгоритма расчета и проектирования (РП) ПЭП, представленного в виде схемы на рис. 4. Данный алгоритм является отражением процесса, предшествующего этапу изготовления ПЭП, базирующегося на требованиях ТЗ к ПЭП и учитывающего необходимость использования методов и методик расчета заданных (требованиями ТЗ) характеристик ПЭП.

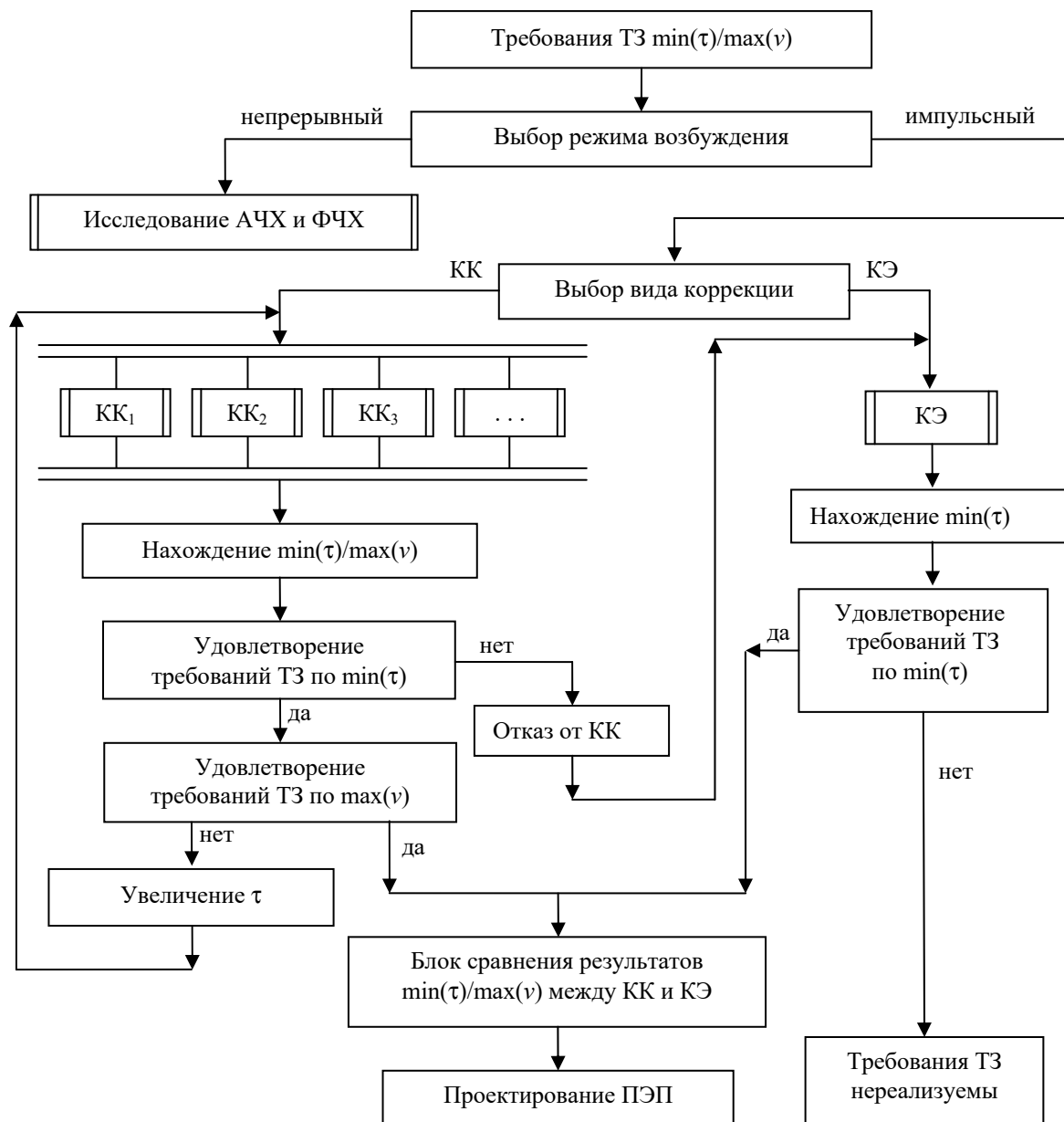


Рис. 4. Схема алгоритма расчета и проектирования ПЭП

Представленный на рис. 4 алгоритм РП ПЭП базируется на анализе разработчиком ПЭП требований ТЗ. Основным критерием при этом является поиск оптимума между максимумом амплитуды зондирующего импульса и минимумом его длительности ( $\min(\tau)/\max(v)$ ), где  $\tau$  – длительность зондирующего импульса,  $v$  – амплитуда колебательной скорости на выходе излучающего ПЭП). В случае возбуждения преобразователя непрерывным электрическим сигналом расчет ведется традиционными методами исследования амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной характеристик (ФЧХ) ПЭП («Исследования АЧХ и ФЧХ ПЭП»). Непрерывный режим работы ПЭП не является предметом исследования данной работы, поэтому в алгоритме РП ПЭП далее не рассматривается. Импульсный режим возбуждения ПЭП предполагает использование в качестве входного электрического сигнала входного воздействия

длительностью, не превышающей нескольких полупериодов колебаний на собственной частоте колебаний ПЭП. Для достижения требований ТЗ у разработчика может возникнуть необходимость использования методик коррекции ПЭП (КК1, КК2, КК3, КЭ и др.). Для этого в алгоритме предусмотрено наличие блоков «Выбор вида коррекции», «КК1», «КК2», «КК3», «КЭ» и др. Каждый из этих блоков предполагает использование методов и методик расчета характеристик ПЭП ( $\tau$  и  $\nu$ ), описание которых будет изложено в последующих работах. В рамках этих методик коррекции происходит оценка  $\min(\tau)$  для ПЭП («Нахождение  $\min(\tau)$ »). Если минимальная длительность сигнала не удовлетворяет требованиям ТЗ («Удовлетворение требованиям ТЗ по  $\min(\tau)$ »), то проектирование ПЭП по требованиям ТЗ невозможно. В этом случае заказчику необходим обоснованный ответ о невозможности выполнения его требований. Если же поставленная задача выполнима, то при использовании методик КК необходимо еще и учет амплитуды зондирующего импульса («Удовлетворение требованиям ТЗ по  $\max(\nu)$ »). При значении максимальной амплитуды в импульсе меньше заданной по ТЗ необходимо увеличить длительность зондирующего сигнала  $\tau$  («Увеличение  $\tau$ ») в пределах допустимых по ТЗ и повторить цикл коррекции КК. Такие итерации могут быть проведены многократно. Алгоритм завершается блоками «Блок сравнения результатов  $\min(\tau)/\max(\nu)$  между КК и КЭ» и «Проектирование ПЭП». Сравнение результатов позволяет выделить наилучшую методику коррекции из КК и КЭ или их совокупности и приступить к конструированию ПЭП.

### Заключение

Представлена обобщенная структурная схема, описывающая алгоритм расчета и проектирования ПЭП. На базе рассмотренного алгоритма РП ПЭП осуществляется поиск критерия, позволяющего определить оптимум между формой сигнала, излучаемого ПЭП, и его длительностью.

Работа является первой в цикле работ, посвященных синтезу и коррекции входных и выходных электрических и акустических сигналов в системах излучения-приема. В последующих статьях будет раскрыта и подтверждена правомерность применения коррекции акустических сигналов.

### Список литературы

1. Неразрушающий контроль: справ. : в 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / под общ. ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Алешин Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений : учеб. пособие. М. : Машиностроение, 2006. 366 с.
3. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс : Минтис, 1974. 256 с.
4. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М. : Машиностроение, 1986. 280 с.
5. Ганопольский В. В., Касаткин Б. А., Легуша Ф. Ф. [и др.] Пьезокерамические преобразователи : справ. / под ред. С. И. Пугачева. Л. : Судостроение, 1984. 256 с.
6. Королев М. В., Карпельсон А. Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М. : Машиностроение, 1982. 157 с.
7. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики / под ред. В. М. Шарапова. М. : Техносфера, 2006. 632 с.
8. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Сотула Ж. В., Куницкая И. Г. Электроакустические преобразователи / под ред. В. М. Шарапова. М. : Техносфера, 2013. 296 с.
9. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб. : Политехника, 2014. 294 с.

### References

1. Klyueva V.V. (ed.). *Nerazrushayushchiy kontrol': sprav.: v 7 t. T. 3. Ul'trazvukovoy kontrol' = Ultrasonic control*. Moscow: Mashinostroenie, 2004:864. (In Russ.)
2. Aleshin N.P. *Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedineniy: ucheb. posobie = Physical methods of non-destructive testing of welded joints : textbook*. Moscow: Mashinostroenie, 2006:366. (In Russ.)

3. Domarkas V.I., Kazhis R.-I.Yu. *Kontrol'no-izmeritel'nye p'ezoelektricheskie preobrazovateli = Control and measuring piezoelectric converters*. Vil'nyus: Mintis, 1974:256. (In Russ.)
4. Ermolova I.N. (ed.). *Ul'trazvukovye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya = Ultrasonic transducers for non-destructive testing*. Moscow: Mashinostroenie, 1986:280. (In Russ.)
5. Ganopol'skiy V.V., Kasatkin B.A., Legusha F.F. et al. *P'ezokeramicheskie preobrazovateli: cprav. = Piezoceramic converters : handbook*. Leningrad: Sudostroenie, 1984:256. (In Russ.)
6. Korolev M.V., Karpel'son A.E. *Shirokopolosnye ul'trazvukovye p'ezopreobrazovateli = Broadband ultrasonic piezoelectric converters*. Moscow: Mashinostroenie, 1982:157. (In Russ.)
7. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *P'ezoelektricheskie datchiki = Piezoelectric sensors*. Moscow: Tekhnosfera, 2006:632. (In Russ.)
8. Sharapov V.M., Minaev I.G., Sotula Zh.V., Kunitskaya I.G. *Elektroakusticheskie preobrazovateli = Electroacoustic converters*. Moscow: Tekhnosfera, 2013:296. (In Russ.)
9. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G. *Osobennosti impul'snykh rezhimov raboty elektroakusticheskikh p'ezoelektricheskikh preobrazovateley = Features of pulsed modes of operation of electroacoustic piezoelectric converters*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2014:294. (In Russ.)

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

#### **Сергей Ильич Коновалов**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроакустики  
и ультразвуковой техники,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В. И. Ульянова (Ленина)  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5)  
E-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

#### **Sergey I. Konovalov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of electroacoustics and ultrasonic engineering,  
St. Petersburg, Russia Electrotechnical University  
«LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin)  
(5 Prof. Popova street, St. Petersburg, Russia)

#### **Роман Сергеевич Коновалов**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроакустики  
и ультразвуковой техники,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В. И. Ульянова (Ленина)  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5);  
доцент кафедры методов и приборов  
неразрушающего контроля,  
Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
Московский просп., 9)  
E-mail: rskonovalov.eut@gmail.com

#### **Roman S. Konovalov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of electroacoustics and ultrasonic engineering,  
St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»  
named after V.I. Ulyanov (Lenin)  
(5 Prof. Popova street, St. Petersburg, Russia);  
associate professor of the sub-department  
of methods and devices for nondestructive testing,  
Emperor Alexander I St. Petersburg  
State Transport University  
(9 Moskovsky avenue, St. Petersburg, Russia)

#### **Валерий Михайлович Цаплев**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры электроакустики  
и ультразвуковой техники,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В. И. Ульянова (Ленина)  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5)  
E-mail: valery@convergences-fr.ru

#### **Valeriy M. Tsaplev**

Doctor of technical sciences, professor, professor  
of the sub-department of electroacoustics  
and ultrasonic engineering,  
St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»  
named after V.I. Ulyanov (Lenin)  
(5 Prof. Popova street, St. Petersburg, Russia)

**Зафар Мухамедович Юлдашев**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой биотехнических систем,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В. И. Ульянова (Ленина)  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5)  
E-mail: yuld@mail.ru

**Zafar M. Yuldashev**

Doctor of technical sciences, professor,  
head of the sub-department  
of biotechnical systems,  
St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»  
named after V.I. Ulyanov (Lenin)  
(5 Prof. Popova street, St. Petersburg, Russia)

**Дмитрий Иванович Нефедьев**

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

**Dmitriy I. Nefed'ev**

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)

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

**Поступила в редакцию/Received 05.05.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 04.06.2022**

**Принята к публикации/Accepted 06.06.2022**

УДК 629.7.017  
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-5

## ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОВЕРОЧНЫХ ОРГАНОВ

А. С. Ефремов<sup>1</sup>, Д. С. Васюкович<sup>2</sup>, С. В. Пузанков<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1,2,3</sup> vka@mil.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Важной составляющей метрологического обеспечения технических систем является поверка средств измерений, выполняемая в поверочных подразделениях, входящих в состав метрологических служб. От эффективности функционирования поверочных органов в существенной степени зависит качество функционирования технических систем в целом. Актуальность темы обусловлена важностью задач обеспечения эффективности поверочной деятельности при организации работ поверочных органов. Целью работы является анализ и обоснование состава показателей эффективности поверочных работ, разработка и описание подходов к их расчету с учетом структурно-функциональных параметров системы поверочных органов. *Материалы и методы.* Исследования основываются на использовании теории вероятности, теории массового обслуживания, теории надежности и квалиметрии применительно к задачам оценки эффективности функционирования системы поверочных органов. *Результаты.* Рассмотрен состав показателей результативности, оперативности и ресурсоемкости для оценки эффективности выполнения поверочных работ. Приведено описание и основные расчетные соотношения для определения показателей применительно к распределенной системе источников заявок на обслуживание и поверочных органов. *Выводы.* С использованием рассмотренных подходов может быть определен ряд важных технико-экономических показателей эффективности поверочных работ в системе поверочных органов. Результаты могут быть использованы как при анализе и оценке результатов деятельности существующих поверочных органов, так и при обосновании вариантов организации и планирования поверочных работ.

**Ключевые слова:** поверка средств измерений, поверочные органы, эффективность, результативность, оперативность, ресурсоемкость, технико-экономические показатели

**Для цитирования:** Ефремов А. С., Васюкович Д. С., Пузанков С. В. Оценка технико-экономической эффективности функционирования системы поверочных органов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 47–55. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-5

## ASSESSMENT OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF THE FUNCTIONING OF THE SYSTEM OF VERIFICATION BODIES

A.S. Efremov<sup>1</sup>, D.S. Vasyukovich<sup>2</sup>, S.V. Puzankov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia  
<sup>1,2,3</sup> vka@mil.ru

**Abstract.** *Background.* An important component of the metrological support of technical systems is the verification of measuring instruments, performed in the verification departments that are part of the metrological services. The quality of functioning of technical systems as a whole largely depends on the effectiveness of the functioning of verification bodies. The relevance of the topic is due to the importance of the tasks of ensuring the effectiveness of verification activities in the organization of the work of verification bodies. The purpose of the work is to analyze and justify the composition of the performance indicators of verification work, to develop and describe approaches to their calculation, taking into account the structural and functional parameters of the system of verification bodies. *Materials and methods* The research is based on the use of probability theory, queuing theory, reliability theory and qualimetry in relation to the problems of evaluating the effectiveness of the system of verification bodies. *Results.* The composition of indicators of effectiveness, efficiency and resource intensity for assessing the effectiveness of verification work is considered. A description and basic calculation ratios for determining indicators in relation to a distributed system of sources of service requests and verification bodies are given. *Conclusion.* Using the considered approaches, a number of important technical and economic indicators of the effectiveness of verification work in the system of verification bodies can be determined. The results can be used both in the analysis and evaluation

of the results of the activities of existing verification bodies, and in substantiating options for organizing and planning verification work.

**Keywords:** verification of measuring instruments, verification bodies, efficiency, effectiveness, resource intensity, technical and economic indicators

**For citation:** Efremov A.S., Vasyukovich D.S., Puzankov S.V. Assessment of the technical and economic efficiency of the functioning of the system of verification bodies. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):47–55. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-5

### *Введение*

Одной из форм государственного регулирования в области обеспечения единства измерений является поверка средств измерений – совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений установленным метрологическим требованиям<sup>1</sup>. Поверка средств измерений производится в поверочных органах (организациях, подразделениях), входящих в структуру государственной и ведомственных метрологических служб и аккредитованных в соответствии с законодательством Российской Федерации.

При оценке результатов производственной деятельности метрологических служб, обосновании состава и порядка функционирования поверочных подразделений ведомственных метрологических служб, при организации и планировании работ по поверке средств измерений становится необходимой оценка их качества. Наиболее полно качество сложных технических систем, к которым относятся и поверочные подразделения, можно оценить по совокупности технико-экономических показателей, характеризующих процессы их целевого функционирования – показателей эффективности.

### *Постановка задачи*

Под эффективностью в соответствии с работами [1, 2] понимают комплексное операционное свойство целенаправленного процесса функционирования, характеризующее его приспособленность к выполнению стоящей перед системой задачи. Применительно к основной производственной деятельности поверочных органов целенаправленным процессом их функционирования является процесс поверки средств измерений. Эффективность такого процесса является комплексным свойством, для количественной оценки которого следует использовать совокупность показателей. Состав показателей эффективности поверочной деятельности должен определяться целями и задачами исследований и отвечать при этом требованиям полноты, доступности (измеряемости), адекватности, наличия физического смысла, универсальности, избыточности.

Анализ процессов функционирования поверочных органов государственной и ведомственных метрологических служб, а также известных подходов к оценке их качества свидетельствуют о том, что в обобщенном виде содержание их деятельности состоит в выполнении в соответствии с имеющимися требованиями некоторых объемов и видов поверочных работ при использовании для этого временных и иных (технических, энергетических, финансовых и пр.) ресурсов. В соответствии с этим деятельность поверочных органов целесообразно характеризовать показателями, которые можно разделить на три группы:

- функциональные показатели, характеризующие достижение целевого (полезного) эффекта – выполнения с требуемым качеством поверки некоторого количества средств измерений определенных типов;
- временные показатели, характеризующие продолжительности основных составляющих процессов функционирования поверочных органов и поверки средств измерений;
- показатели ресурсоемкости, характеризующие затраты ресурсов различных видов на создание и функционирование поверочных органов. Отметим, что показатели данной группы могут быть сведены к экономическим показателям посредством пересчета затрат ресурсов различных видов в соответствующие стоимостные затраты.

С учетом изложенного и общих принципов оценки эффективности сложных технических систем [1, 2] технико-экономическую эффективность функционирования поверочных ор-

<sup>1</sup> Об обеспечении единства измерений : федер. закон № 102-ФЗ от 26.06.2008.



ганов целесообразно рассматривать как комплексное свойство, объединяющее частные свойства: результативность, оперативность и ресурсоемкость. Соответственно, в качестве показателей эффективности функционирования поверочных органов и выполнения работ по поверке средств измерений целесообразно использовать набор технико-экономических показателей, представленный в обобщенном виде

$$Y = (Y_R, Y_T, Y_C) \quad (1)$$

где  $Y_R$  – показатели результативности, характеризующие степень соответствия достигаемых полезных результатов функционирования поверочных органов предъявляемым требованиям;  $Y_T$  – показатели оперативности, характеризующие временные составляющие процессов функционирования поверочных органов и поверки средств измерений;  $Y_C$  – экономические (стоимостные) показатели, характеризующие в стоимостном выражении составляющие затрат различных видов на построение и функционирование системы поверочных органов.

Рассматриваемые частные показатели эффективности могут быть представлены как некоторые функции от параметров системы поверки в обобщенном виде

$$Y = f(X_1, X_2), \quad (2)$$

где  $X_1$  – вектор параметров и характеристик совокупности объектов обслуживания (число и типы поверяемых средств измерений, нагрузочные характеристики потоков заявок на обслуживание, распределение нагрузки между поверочными органами и пр.);  $X_2$  – вектор структурных и функциональных параметров системы поверочных органов (территориальное расположение, области аккредитации, количество и типы рабочих мест, порядок и интенсивности обслуживания и пр.);  $Y$  – обобщенное обозначение частного показателя эффективности.

#### *Состав и порядок расчета показателей*

При выборе показателей результативности  $Y_R$  следует исходить из того, что в общем случае результатом деятельности является достижение поставленной цели, а результативность характеризует степень достижения цели (целевой эффект) запланированной деятельности. При этом цель определяет планируемый результат деятельности.

Применительно к рассматриваемой задаче основная цель функционирования поверочных органов может быть определена как качественное выполнение за установленный интервал времени (например, за год) некоторого запланированного количества поверок средств измерений различных типов в соответствии с имеющейся областью аккредитации поверочного органа. Будем при этом полагать, что функционирование системы происходит в установленном режиме, объемы поверочных работ на рассматриваемый период определены потребностями обслуживаемых организаций – владельцев средств измерений и заведомо соответствуют потенциальной производительности поверочных органов.

В силу тех или иных случайных факторов и причин при неизменных характеристиках входного потока заявок на поверку фактически достигаемый результат деятельности становится случайным, т.е. по факту результат поверочных работ может отличаться от запланированного. Причина такого несоответствия результата поставленной цели может состоять в неполном соответствии возможностей поверочных органов характеристикам потока заявок (например, при неполном соответствии области аккредитации, недоукомплектованности средствами поверки), в снижении производительности по причине временного отсутствия отдельных средств поверки на рабочих местах, а также в недостаточном качестве поверочных работ, выражающемся в получении неверных результатов поверки.

В качестве наиболее полной характеристики результативности поверочной деятельности могла бы использоваться вероятность достижения цели  $P_{ДЦ}(T_{пл})$  – вероятность того, что за установленный интервал времени  $T_{пл}$  объем качественно выполненных поверочных работ окажется не меньше, чем изначально было запланировано, т.е.

$$P_{\text{ДЦ}}(T_{\text{пл}}) = P(N_p(T_{\text{пл}}) \geq N_0(T_{\text{пл}})), \quad (3)$$

где  $N_0(T_{\text{пл}})$  – запланированный на интервал времени  $T_{\text{пл}}$  объем поверочных работ;  $N_p(T_{\text{пл}})$  – объем качественно выполненных (результативных) поверочных работ за время  $T_{\text{пл}}$ .

Для расчета значений показателей вида (3) требуется аналитическое выражение функции распределения вероятностей целевого результата функционирования. Корректное определение такой аналитической зависимости является достаточно сложной задачей. Поэтому в качестве оценки степени достижения цели функционирования поверочных органов представляется возможным использовать показатель, характеризующий соотношение между фактическими результативными и плановыми объемами поверочных работ, т.е. отношение количества качественно выполненных за плановый период проверок средств измерений к числу запланированных проверок.

Если при этом речь идет о проверке средств измерений  $K$  типов, и  $N_k(T_{\text{пл}})$  ( $k = \overline{1, K}$ ) – количество проверок средств измерений  $k$ -го типа за интервал времени  $T_{\text{пл}}$ , то показатель результативности может быть определен в виде соотношения

$$R = \frac{N_p(T_{\text{пл}})}{N_0(T_{\text{пл}})} = \sum_{k=1}^K N_{k_p}(T_{\text{пл}}) / \sum_{k=1}^K N_{k_0}(T_{\text{пл}}). \quad (4)$$

Отметим, что показатель вида (4) может быть использован для случая, когда проверка средств измерений разных типов имеет одинаковую ценность (или важность).

Если поток заявок на проверку формируется из нескольких типов средств измерений, для каждого из которых известны средние величины межповерочных интервалов, общее количество проверок средств измерений всех типов за плановый период может быть определено выражением

$$N_0(T_{\text{пл}}) = \sum_{k=1}^K n_k \lambda_k T_{\text{пл}}, \quad (5)$$

где  $n_k$  и  $\lambda_k$  ( $k = \overline{1, K}$ ) – количество средств измерений  $k$ -го типа и интенсивность потока заявок на проверку от средств  $k$ -го типа соответственно, при этом  $\lambda = 1/T_{\text{п}}$ ,  $T_{\text{п}}$  – средний интервал времени между двумя последовательными заявками на проверку.

При определении фактически выполняемого объема поверочных работ будем иметь в виду, что в установившемся режиме при условии отсутствия перегрузок и отказов в обслуживании производительность системы (интенсивность потока обслуженных заявок) совпадает с интенсивностью поступления заявок в систему [3]. Однако, как уже отмечалось, при неизменных характеристиках входного потока заявок на проверку фактически достигаемый за заданное время объем качественно выполненных поверочных работ может отличаться от запланированного по ряду причин.

Укомплектованность поверочного органа средствами проверки и соответствие его областей аккредитации потребностям в удовлетворении заявок на проверку  $k$ -го типа может быть учтена с использованием коэффициента укомплектованности  $K_{y_k}$ , принимающего значения 0 или 1:

$$K_{y_k} = \begin{cases} 1, & \text{если заявка } k\text{-го типа может быть обслужена,} \\ 0, & \text{если заявка } k\text{-го типа не может обслуживаться.} \end{cases} \quad (6)$$

Временное отсутствие отдельных средств проверки на рабочих местах поверителей по причинам выполнения на них плановых и внеплановых мероприятий по управлению их техническим состоянием (техническое обслуживание, ремонт, аттестация или проверка и пр.) целесообразно учесть применением коэффициента технического использования [4]. Будем при этом считать, что в составе рабочего места по проверке имеется некоторое количество средств

поверки (рабочих эталонов и вспомогательных средств). Причем отсутствие по любым причинам хотя бы одного из них приводит к невозможности выполнения полноценной поверки средств измерений на данном рабочем месте, что равносильно отказу в обслуживании и простою данного рабочего места в целом. Поэтому если в составе рабочего места для поверки средств измерений  $k$ -го типа применяется  $R_k$  средств поверки ( $k = \overline{1, K}$ ), то коэффициент технического использования данного рабочего места определится выражением

$$K_{\text{ТИ}_k} = \prod_{r=1}^{R_k} K_{\text{ТИ}_r}. \quad (7)$$

С учетом указанных обстоятельств может быть определено среднее количество фактически выполняемых за плановый интервал времени поверок средств измерений всех типов:

$$N_{\phi}(T_{\text{пл}}) = \sum_{k=1}^K K_{y_k} K_{\text{ТИ}_k} n_k \lambda_k T_{\text{пл}}. \quad (8)$$

Однако в составе фактически выполненных поверочных работ результативными можно считать только те, которые выполнены качественно, т.е. при их выполнении не допущено ошибок, и результаты поверки являются правильными, т.е. соответствуют действительности. Поверка с ошибочным результатом, хотя на нее и затрачены ресурсы и время, не должна быть учтена в составе результативных.

Целью поверки является подтверждение соответствия средств измерений метрологическим требованиям<sup>1</sup>, а результатом поверки – заключение о пригодности (или непригодности) средства измерений к применению. Исходя из этого, результаты поверки будем считать правильными, если в соответствии с ними фактически метрологически исправное средство измерений признано пригодным, а метрологически неисправное средство измерений – непригодным. Тогда вероятность правильного (результативного) выполнения поверки может быть оценена следующим выражением:

$$P_p = P_{\text{МИ}}(1 - \alpha) + (1 - P_{\text{МИ}})(1 - \beta), \quad (9)$$

где  $P_{\text{МИ}}$  и  $(1 - P_{\text{МИ}}) = P_{\text{МО}}$  – вероятность нахождения поверяемого средства измерений на момент поверки в состоянии метрологической исправности и метрологической неисправности (метрологический отказ) соответственно;  $\alpha$  – вероятность ошибочного признания метрологически исправного средства измерений метрологически неисправным (ошибка 1-го рода);  $\beta$  – вероятность ошибочного признания метрологически неисправного средства измерений метрологически исправным (ошибка 2-го рода).

Значение указанной вероятности для разных типов поверяемых средств измерений будет различным. При этом для большой группы однотипных средств измерений в стационарном режиме функционирования значение вероятности, определяемой выражением (9), будет характеризовать долю правильных исходов поверок относительно числа фактически выполненных:  $N_{p_k}(T_{\text{пл}}) / N_{\phi_k}(T_{\text{пл}})$ .

В результате показатель (4) результативности функционирования поверочного органа может быть определен в виде соотношения

$$R = \frac{N_p(T_{\text{пл}})}{N_o(T_{\text{пл}})} = \sum_{k=1}^K P_{p_k} K_{y_k} K_{\text{ТИ}_k} n_k \lambda_k / \sum_{k=1}^K n_k \lambda_k. \quad (10)$$

Как видно из выражения (10), данный показатель имеет физический смысл коэффициента удельной производительности поверочного органа, определяемого с учетом укомплектованности и технической готовности средств поверки, а также правильности результатов поверки.

<sup>1</sup> Об обеспечении единства измерений : федер. закон № 102-ФЗ от 26.06.2008.

Как уже отмечалось, применение показателя вида (4) более корректно в случае, если проверка средств измерений разных типов имеет одинаковую значимость (важность). Однако во многих реальных ситуациях это не так. Наличие поверенных средств измерений одного типа может быть более важным для решения задач более высокого уровня и функционирования системы в целом, чем средств измерений другого типа. Наиболее актуален учет важности средств измерений может быть при оценке результативности поверочных работ в ведомственной метрологической службе, где и применение средств измерений по назначению, и их метрологическое обслуживание должны быть подчинены достижению единых целей. В зависимости от типа средства измерений, места и задач их применения по назначению возможно различное влияние на целевой полезный эффект функционирования, например, на некоторый обобщенный показатель качества функционирования всей системы. Для такой ситуации целесообразно дополнить ранее полученные выражения для показателя результативности применением средневзвешенных показателей. Учесть важность (значимость) различных типов средств измерений при этом возможно с использованием коэффициентов весомости.

Коэффициенты весомости  $m_k$  ( $k = \overline{1, K}$ ) представляют собой безразмерные величины, отражающие влияние средств измерений различных типов, задействованных в общей задаче, на достижение полезного эффекта.

Определение коэффициентов весомости может быть выполнено с использованием различных методов, например, экспертного, стоимостного, метода эквивалентных соотношений и др. [5]. Применительно к рассматриваемой задаче представляется целесообразным использование метода эквивалентных соотношений, который в данном случае заключается в определении изменения в процентах обобщенного показателя качества функционирования системы в целом  $\Delta Q_k$  в зависимости от изменения в процентах продолжительности  $\Delta \tau_k$  использования при функционировании системы средств измерений  $k$ -го типа. В этом случае коэффициенты весомости могут быть вычислены через соотношение

$$m_k = \frac{\Delta Q_k}{\Delta \tau_k}. \quad (11)$$

Большее значение коэффициента весомости будет у того средства измерений, которое при равном с другими средствами измерений приращении времени использования дает большее приращение обобщенного показателя качества функционирования системы в целом.

В этом случае с учетом различной важности средств измерений показатель результативности может быть определен выражением

$$R = \frac{\sum_{k=1}^K m_k N_{k_p}(T_{пл})}{\sum_{k=1}^K m_k N_{k_0}(T_{пл})}. \quad (12)$$

При оценке эффективности функционирования поверочных органов, помимо достигнутого результата, значимыми также являются временные характеристики процесса, а также задействованные и расходуемые при функционировании ресурсы.

Оперативность определяется расходом времени, потребного для достижения цели функционирования системы, а также необходимого для выполнения основных составляющих процессов функционирования поверочных органов и проверки средств измерений, и характеризуется показателями оперативности  $Y_T$ .

В качестве вероятностно-временного показателя оперативности деятельности поверочного органа можно использовать вероятность того, что фактическое время  $\tau_\phi$  выполнения требуемого объема  $N_0$  работ по проверке не превысит планового  $T_{пл}$ :

$$P_{N_0}(T_{пл}) = P_{N_0}(\tau_\phi \leq T_{пл}). \quad (13)$$

Помимо показателя (12), для определения которого необходимы данные о законе распределения времени обслуживания, в составе показателей оперативности целесообразно использовать средние времена обслуживания заявок в целом, а также отдельных составляющих процесса проверки и функционирования поверочного органа.

Среднее время обслуживания заявки на поверку  $\tau_{\text{обсл}}$  складывается из времени доставки средства измерений (туда и обратно)  $\tau_{\text{тр}}$ , времени ожидания в очереди  $\tau_{\text{ож}}$  и, собственно, времени выполнения поверки  $\tau_{\text{п}}$ , и для средств измерений  $k$ -го типа определяется как

$$\tau_{\text{обсл}_k} = \tau_{\text{тр}_k} + \tau_{\text{ож}_k} + \tau_{\text{п}_k} . \quad (14)$$

Значения указанных составляющих определяются совокупностью характеристик потоков заявок на обслуживание, а также структурных и функциональных параметров системы поверочных органов [6].

Информативным показателем также является средняя доля времени, в течение которого средство измерений отсутствует на месте штатной эксплуатации по причине проведения поверки. Для стационарного режима эксплуатации данная величина имеет физический смысл оценки вероятности застать средство измерений в произвольный момент времени в состоянии нахождения на поверке (включая время доставки и ожидания обслуживания) и может быть определена выражением

$$P_{nk} = \frac{1}{n_k T_{\text{пл}}} \sum_{i=1}^{n_k} \tau_{\text{обсл}_k} (T_{\text{пл}}), \quad (15)$$

где  $\tau_{\text{обсл}_k} (T_{\text{пл}})$  – общая продолжительность нахождения  $i$ -го средства измерений  $k$ -го типа на поверке за интервал времени  $T_{\text{пл}}$ .

Эффективность поверочной деятельности характеризуется соотношением достигнутых результатов поверки и задействованных при этом ресурсов. Как уже отмечалось, показатели ресурсоемкости могут быть сведены к стоимостным показателям  $Y_C$ , характеризующим в денежном выражении составляющие затрат различных видов.

В состав стоимостных показателей входят составляющие единовременных и текущих затрат, которые с учетом применения годового планирования поверочных работ принято приводить к одному году. Суммарные затраты на организацию и проведение поверки могут быть оценены через величину приведенных затрат, определяемых соотношением

$$Z_{\text{пр}} = C_{\text{тек}} + E_n K, \quad (16)$$

где  $C_{\text{тек}}$  – суммарные за год текущие затраты;  $K$  – суммарные единовременные капитальные затраты на создание системы;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

В составе суммарных затрат можно выделить составляющие затрат поверочных органов и затрат организаций – владельцев средств измерений. Последние, в свою очередь, складываются из транспортных затрат, затрат, собственно, на выполнение поверки, а также потерь, обусловленных отсутствием средств измерений на местах их эксплуатации. Порядок расчета составляющих затрат применительно к распределенной системе объектов и поверочных органов рассмотрен в работе [7]. В составе экономических показателей могут использоваться также чистый доход, срок окупаемости, индексы доходности и др.

Оценка эффективности поверочной деятельности может быть необходима как при анализе процессов функционирования, так и при решении задач структурно-параметрического синтеза системы поверочных органов в составе метрологических служб. В общем случае задача выбора варианта по совокупности показателей  $Y = (Y_R, Y_T, Y_C)$  является многокритериальной. В некоторых случаях ее сводят к однокритериальной посредством введения обобщенного показателя эффективности. Для оценки эффективности функционирования поверочных органов с использованием рассмотренных показателей необходимо формирование критерия – правила, по которому принимается решение об уровне эффективности. Выбор такого критерия является субъективным, творческим процессом и определяется спецификой решаемой задачи и системой предпочтений лица, принимающего решение.

### Заключение

С использованием рассмотренных подходов может быть определен ряд важных технико-экономических показателей эффективности поверочных работ. Приведенные результаты могут быть использованы как при анализе и оценке результатов деятельности существующих поверочных органов, так и выборе рациональных или оптимальных вариантов организации и планирования поверочных работ в создаваемой ведомственной системе поверочных органов. Формирование критериев выбора и определение предпочтительных вариантов является задачей, требующей отдельного рассмотрения.

### Список литературы

1. Петухов Г. Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч. 1. Методология, методы, модели. Л. : Министерство обороны СССР, 1989. 647 с.
2. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М. : АСТ, 2006. 502 с.
3. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М. : Машиностроение, 1979. 432 с.
4. Дорохов А. Н., Керножицкий В. А., Миронов А. Н., Шестопалова О. Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. СПб. : Лань, 2016. 352 с.
5. Аристов О. В. Управление качеством. М. : ИНФРА-М, 2020. 224 с.
6. Ефремов А. С., Швед А. С., Лукичев Л. В. Структурно-функциональная модель распределенной системы поверочных органов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 22–30. doi:10.21685/2307-5538-2020-2-3
7. Ефремов А. С., Иванов А. В., Лукичев Л. В. Определение показателей качества организации поверочных работ в децентрализованной распределенной системе поверочных органов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 30–38. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-4

### References

1. Petukhov G.B. *Osnovy teorii effektivnosti tselenapravlennykh protsessov. Ch. 1. Metodologiya, metody, modeli = Fundamentals of the theory of the effectiveness of purposeful processes. Part 1. Methodology, methods, models.* Leningrad: Ministerstvo oborony SSSR, 1989:647. (In Russ.)
2. Petukhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya tselenapravlennykh protsessov i tselestremennykh system = Methodological foundations of external design of purposeful processes and purposeful systems.* Moscow: AST, 2006:502. (In Russ.)
3. Kleynrok L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya = Theory of queuing.* Moscow: Mashinostroenie, 1979:432. (In Russ.)
4. Dorokhov A.N., Kernozhitskiy V.A, Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh system = Ensuring the reliability of complex technical systems.* Saint Petersburg: Lan', 2016:352. (In Russ.)
5. Aristov O.V. *Upravlenie kachestvom = Quality management.* Moscow: INFRA-M, 2020:224. (In Russ.)
6. Efremov A.S., Shved A.S., Lukichev L.V. Structural and functional model of a distributed system of verification organs. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):22–30. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2020-2-3
7. Efremov A.S., Ivanov A.V., Lukichev L.V. Determination of quality indicators of the organization of verification work in a decentralized distributed system of verification bodies. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(2):30–38. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-4

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Андрей Станиславович Ефремов

кандидат технических наук, доцент,  
преподаватель кафедры метрологического  
обеспечения вооружения, военной  
и специальной техники,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

#### Andrey S. Efremov

Candidate of technical sciences, associate professor,  
lecturer of the sub-department  
of metrological support of arms,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Дмитрий Степанович Васюкович**

соискатель,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

**Dmitriy S. Vasyukovich**

Applicant,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Сергей Владимирович Пузанков**

адъюнкт,  
кафедра метрологического обеспечения  
вооружения, военной и специальной техники,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

**Sergey V. Puzankov**

Adjunct,  
sub-department of metrological support of arms,  
military and special equipment,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 25.03.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 25.04.2022**

**Принята к публикации/Accepted 23.05.2022**

УДК 681.586  
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-6

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД МЕТОДОМ УЛУЧШЕННОЙ ПОЛНОЙ МНОЖЕСТВЕННОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ НА ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЫ

В. В. Козлов<sup>1</sup>, Е. А. Фокина<sup>2</sup>, А. А. Трофимов<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

<sup>1</sup>val369@mail.ru, <sup>2</sup>Ekaterina.isay1997@gmail.com, <sup>3</sup>iit@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* При распознавании речевых сигналов для работы в различных сферах жизни человека разработчику приходится решать проблемы обработки речевых сигналов, в частности проблему их нестационарности. Для решения этой проблемы существуют различные методы предварительной обработки, поэтому необходимо выбрать наилучший метод. *Материалы и методы.* Для предварительной обработки речевых сигналов был выбран наилучший метод, а именно улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом (УПМДЭМАШ). Проведено моделирование разложения речевых сигналов на составляющие с помощью УПМДЭМАШ, выделение наиболее информативной составляющей и перевод ее в частотную область с помощью преобразования Фурье. *Результаты.* Был проведен сравнительный анализ выделенных составляющих для разных команд, также был сделан вывод о правильности выбора метода и информативной составляющей.

**Ключевые слова:** речевые сигналы, предварительная обработка, декомпозиция на эмпирические моды, преобразование Фурье

**Для цитирования:** Козлов В. В., Фокина Е. А., Трофимов А. А. Предварительная обработка сигнала при распознавании голосовых команд методом улучшенной полной множественной декомпозиции на эмпирические моды // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 56–61. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-6

## PRE-PROCESSING OF SIGNAL IN RECOGNITION OF VOICE COMMANDS BY METHOD OF IMPROVED COMPLETE MULTIPLE DECOMPOSITION TO EMPIRICAL MODES

V.V. Kozlov<sup>1</sup>, E.A. Fokina<sup>2</sup>, A.A. Trofimov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> Research and Development Institute for Physical Measurements, Penza, Russia

<sup>1</sup>val369@mail.ru, <sup>2</sup>Ekaterina.isay1997@gmail.com, <sup>3</sup>iit@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* In the recognition of speech signals to work in various spheres of human life, the developer has to solve the problem of processing of speech signals, in particular the problem of non-stationarity. To solve this problem, there are various preprocessing methods and it is necessary to choose the best method. *Materials and methods.* For the preprocessing of the speech signals the best method was chosen, namely, the improved full multiple decomposition into empirical modes with adaptive noise (IFMDEMAN). We modeled the decomposition of speech signals into components using IFMDEMAN, extracted the most informative component and translated it into the frequency domain using the Fourier transform. *Results.* As a result of this work, a comparative analysis of the selected components for different teams, as well as a conclusion about the correctness of the choice of the method and the choice of the informative component.

**Keywords:** speech signals, preprocessing, decomposition into empirical modes, Fourier transform

**For citation:** Kozlov V.V., Fokina E.A., Trofimov A.A. Pre-processing of signal in recognition of voice commands by method of improved complete multiple decomposition to empirical modes. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):56–61. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-6



### *Введение*

Речевой сигнал является аналоговым, поэтому для проведения каких-либо работ с ним сначала его преобразуют в дискретные сигналы. После чего речевой сигнал представлен в виде зависимости амплитуды от дискретных отсчетов времени.

Из-за сложности речевого сигнала, а именно из-за не стационарности данного сигнала, его предварительная обработка – один из важных шагов при распознавании речи. На этом этапе осуществляются фильтрация, кодирование, восстановление речи.

Основными методами предварительной обработки речевых сигналов являются:

1) преобразование Фурье является частотным методом. Недостаток – частотные компоненты не могут быть локализованы во времени;

2) вейвлет-преобразование является частотно-временным методом. Он стал альтернативой в обработке речевого сигнала преобразованию Фурье. Недостатком этого метода является большое количество предварительных вычислений;

3) в результате декомпозиции на эмпирические моды сигнал раскладывается на составляющие, называемыми модами. И достоинством этого метода является то, что эти моды вычисляются в ходе процесса обработки и не требуется никаких предварительных расчетов. Поэтому данный метод и будет далее рассматриваться.

### *Описание метода декомпозиции на эмпирические моды и выбор подметода*

Метод декомпозиции на эмпирические моды является итерационной вычислительной процедурой, после прохождения которой исходные сигналы раскладываются на эмпирические моды. Эмпирические моды не задаются заранее, а вычисляются в ходе процесса, что и выделяется в названии метода. Данный метод используется при обработке нестационарных сигналов за счет способности анализа локальных явлений.

Эмпирическая мода, внутреннее колебание или мода – эта функция, которая обладает следующими свойствами:

1) при сравнении количества максимумов и минимумов с количеством пересечений нуля, результаты не должны отличаться более, чем на единицу;

2) среднее значение, которое определяется по двум огибающим – верхней и нижней, должно быть равно нулю.

В основе механизма разложения на эмпирические моды лежит построение гладких огибающих методом сплайн аппроксимации по максимумам и минимумам сигнала и дальнейшее вычитание среднего этих огибающих из исходного сигнала.

Алгоритм действий при разложении сигнала на моды:

1. Сначала определяются точки пересечения функции в нуле и экстремумы.

2. Полученные максимумы и минимумы интерполируют. Методом интерполяции является интерполяция с помощью кубических сплайнов .

3. После вычисляется полусумма огибающих и вычитается из основного сигнала. Полученный сигнал является претендентом на то, чтобы быть первой эмпирической модой (ЭМ). Полученный сигнал проверяют на соответствие двум условиям, описанным ранее. Если сигнал удовлетворяет этим условиям, то он действительно является ЭМ. Если нет, то возвращаемся к пункту 1, только в качестве исходного сигнала будет использоваться сигнал, полученный в пункте 3.

4. После найденная ЭМ вычитается из первоначального сигнала. Остаток сигнала после этой процедуры используется для повторения пунктов 1–3 [1].

В результате разложение сигнала на эмпирические моды можно записать в следующем виде:

$$y(i) = \sum_{n=1}^N y_n''(i) + y_{res}(i),$$

где  $y(i)$  – исходный сигнал;  $y_n''(i)$  – эмпирическая мода с номером  $n$ ;  $y_{res}(i)$  – остаток, который может быть трендом или постоянной величиной;  $N$  – общее количество эмпирических мод [2].

Метод декомпозиции на эмпирические моды делится на методы, и одним из таких методов является улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом.

В этом методе для снижения уровня белого шума, который остается в модах, используются не значения мод, а локальные средние значения.

Данный метод обеспечивает:

1) адаптивное разложение, так как базисные функции, используемые при декомпозиции, извлекаются непосредственно из исходного речевого сигнала и позволяют учитывать только ему свойственные особенности (скрытые модуляции, области концентрации энергии и т.п.);

2) уменьшение значения белого шума;

3) отсутствие паразитных ЭМ, возникающих на ранних этапах декомпозиции вследствие перекрытия масштабно-энергетических пространств мод.

Параметры функционирования улучшенной ПМДЭМАШ:

1)  $N_{std}$  – стандартное отклонение амплитуды добавляемого белого шума;

2)  $NR$  – число реализаций декомпозиций (добавлений белого шума);

3)  $MaxIter$  – максимально допустимое количество просеивающих итераций (критерий останова);

4)  $SNRFlag$  – отношения сигнал/шум между добавленным шумом и остатком, к которому добавляется шум (если значение равно 1, тогда отношение сигнал/шум увеличивается для каждого этапа декомпозиции; если равно 2, то отношение сигнал/шум будет одинаковым для всех этапов) [3].

Алгоритм предварительной обработки с помощью метода улучшенной ПМДЭМАШ представлен на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм распознавания речевых сигналов с помощью улучшенной ПМДЭМАШ

### Описание работы

Для распознавания голосовых команд требуется предварительная обработка данного сигнала.

Предварительная обработка происходит в несколько этапов. На первом этапе сигнал оцифровывается. После оцифровки сигнала происходит его разложение с помощью метода декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ). Данный метод описан выше и его результаты представлены на рис. 2.

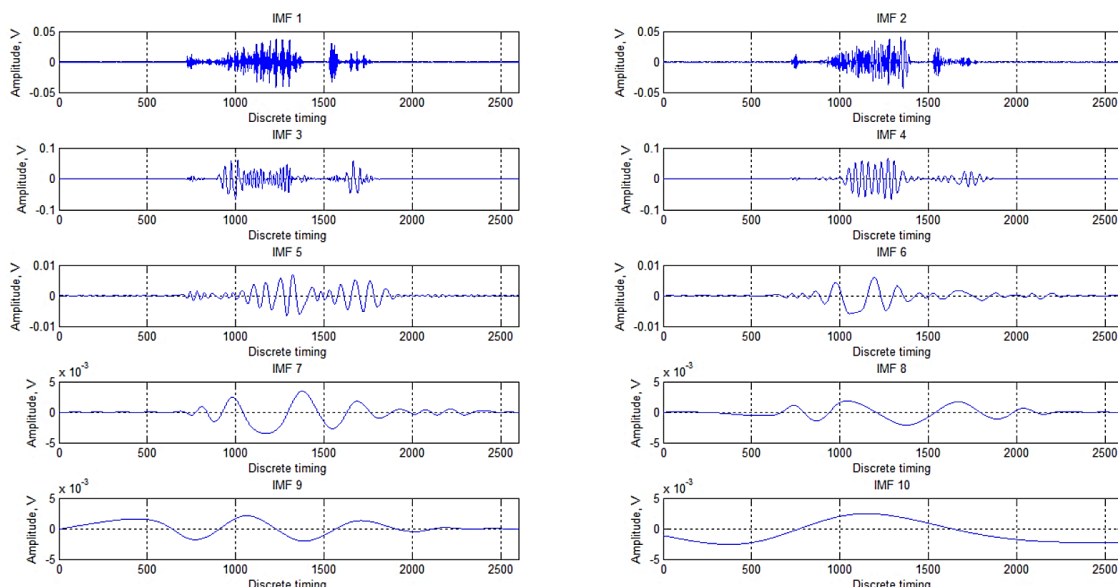


Рис. 2. Результаты разложения сигнала на эмпирические моды

После разложения сигнала на эмпирические моды требуется выделить информативную составляющую. Данная составляющая является наиболее информативной для сигнала и именно она является отличительной для сигнала. В данном сигнале информативной составляющей является четвертая мода (IMF4). Выделение информативной составляющей происходит путем сравнения нескольких разложенных сигналов (рис. 3).

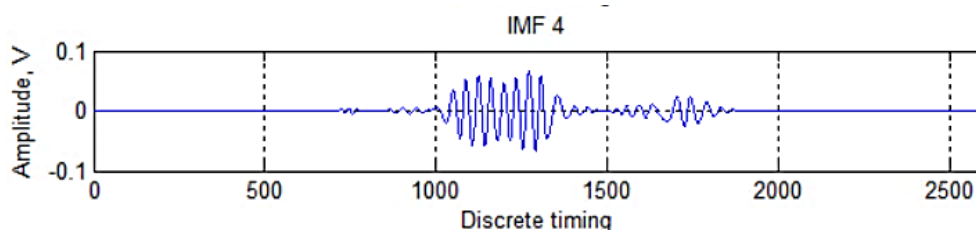


Рис. 3. Информативная мода

Для увеличения вероятности распознавания голосовых команд требуется упростить сигнал. Для этого требуется перейти в частотную область с помощью преобразования Фурье (рис. 4).

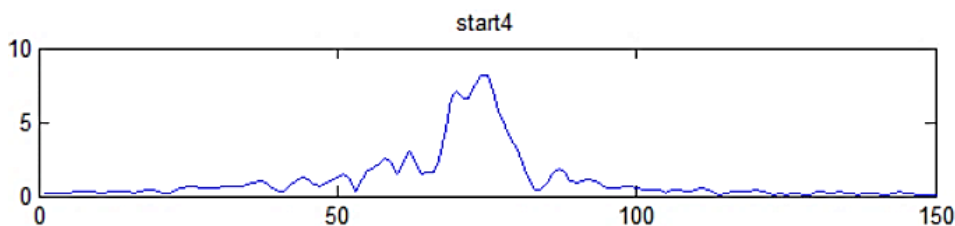


Рис. 4. Информативная мода в частотном виде

Для наглядности эксперимента строятся огибающие графика, представленного выше, и для сравнения с другими сигналами проводится нормирование графиков по оси Y (рис. 5).

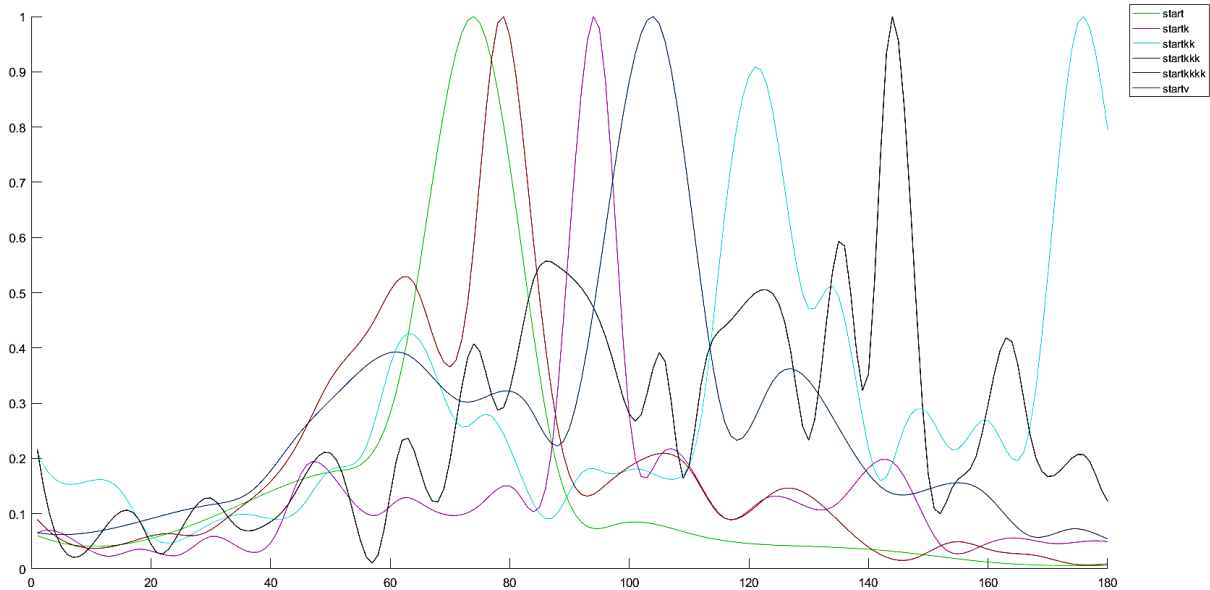


Рис. 5. Результаты обработки

### Заключение

По результатам рассмотрения разновидностей метода декомпозиции на эмпирические моды и выбран наилучший метод, а именно улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом. Произведено моделирование разложения речевого сигнала на моды и выделения информативной моды (составляющей). По полученным модам (с помощью преобразования Фурье) были построены огибающие. В результате построения огибающих информативных составляющих речевых сигналов сделан вывод о правильности выбора информативной моды. На рис. 5 видно, что речевые команды от разных людей после нормализации сигналов схожи по внешнему виду.

### Список литературы

1. Алимуратов А. К., Квитка Ю. С. Применение комплементарной множественной декомпозиции на эмпирические моды для анализа речевых сигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4. С. 69–75.
2. Алимуратов А. К., Чураков П. П., Тычков А. Ю. Фильтрация речевых сигналов с использованием метода множественной декомпозиции и оценки энергии эмпирических мод // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 4. С. 50–61.
3. Омпов В. Д., Бороньев В. В. Комплементарная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом как метод решения основных проблем применения преобразования Гильберта-Хуанга // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 9.

### References

1. Alimuradov A.K., Kvitka Yu.S. Application of complementary multiple decomposition into empirical modes for the analysis of speech signals. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2014;(4):69–75. (In Russ.)
2. Alimuradov A.K., Churakov P.P., Tychkov A.Yu. Filtering of speech signals using the method of multiple decomposition and evaluation of the energy of empirical modes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Izvestia of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences.* 2012;(4):50–61. (In Russ.)
3. Ompokov V.D., Boronoev V.V. Complementary multiple decomposition into empirical modes with adaptive noise as a method for solving the main problems of applying the Hilbert-Huang transform. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radioelectronics.* 2016;(9). (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors*

**Валерий Валерьевич Козлов**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры информационно-измерительной  
техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: val369@mail.ru

**Valeriy V. Kozlov**

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

**Екатерина Александровна Фокина**

инженер-электроник,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: Ekaterina.isay1997@gmail.com

**Ekaterina A. Fokina**

Electronics engineer,  
Research and Development Institute  
for Physical Measurements  
(8/10 Volodarsky street, Penza, 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)

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

**Поступила в редакцию/Received 16.05.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 14.06.2022**

**Принята к публикации/Accepted 18.07.2022**

УДК 621.315.1  
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-7

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСРЕДСТВОМ ВНЕДРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

**В. А. Листюхин<sup>1</sup>, Е. А. Печерская<sup>2</sup>, Д. В. Артамонов<sup>3</sup>,  
Т. О. Зинченко<sup>4</sup>, А. А. Анисимова<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>vladyan4iklist@yandex.ru, <sup>2</sup>peal@list.ru, <sup>3</sup>dmitrartamon@yandex.ru,  
<sup>4</sup>scar0243@gmail.com, <sup>5</sup>an.ryzhova18@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* На основе анализа статистических данных показано, что Пензенский регион относится к «опасной ветровой зоне», в которой аварии на воздушных линиях в осенне-зимний период становятся не редкими явлениями для электросетевых организаций. Это указывает на актуальность изучения подходов к повышению устойчивости систем электроснабжения. *Материалы и методы.* Представлены результаты сравнительного анализа следующих методов контроля параметров воздушных линий: оптический, емкостной, механический, частотный, термодинамический, инклинометрический, а также метод, основанный на 3D-моделировании. *Результаты.* Предложена структура информационно-измерительной системы контроля параметров воздушных линий электропередачи, которая исключает ключевые недостатки, присущие распространенным методам и системам аналогичного назначения: не требуется внесения изменений в конструкции воздушных линий; осуществляется контроль параметров, оказывающих непосредственное влияние на надежное и устойчивое функционирование воздушных линий. *Выводы.* Предложено внедрение информационно-измерительной системы для измерений следующих параметров: угол наклона провода воздушной линии или расстояние и место расположения наименьшего провеса провода до земли; скорость ветровых нагрузок; температура окружающего воздуха. Система позволит электросетевым организациям повысить надежность и качество электроснабжения потребителей.

**Ключевые слова:** надежность, воздушные линии электропередачи, информационно-измерительная система, погодные условия, метеорологические характеристики

**Для цитирования:** Листюхин В. А., Печерская Е. А., Артамонов Д. В., Зинченко Т. О., Анисимова А. А. Повышение надежности воздушных линий электропередачи посредством внедрения информационно-измерительных систем контроля их параметров // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 62–68. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-7

## IMPROVING THE RELIABILITY OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES THROUGH THE INTRODUCTION OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS FOR MONITORING THEIR PARAMETERS

**V.A. Listyukhin<sup>1</sup>, E.A. Pecherskaya<sup>2</sup>, D.V. Artamonov<sup>3</sup>,  
T.O. Zinchenko<sup>4</sup>, A.A. Anisimova<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup>vladyan4iklist@yandex.ru, <sup>2</sup>peal@list.ru, <sup>3</sup>dmitrartamon@yandex.ru,  
<sup>4</sup>scar0243@gmail.com, <sup>5</sup>an.ryzhova18@gmail.com

**Abstract.** *Background.* Based on the analysis of statistical data, it is shown that the Penza region belongs to the "dangerous wind zone", in which accidents on overhead lines in the autumn-winter period become not uncommon phenomena for electric grid organizations. the relevance of studying approaches to improving the stability of power supply systems. This indicates the relevance of studying approaches to improving the stability of power supply systems. *Materials and methods.* The results of a comparative analysis of the following methods for monitoring the parameters of overhead lines are presented: optical, capacitive, mechanical, frequency, thermodynamic, inclinometric, as well as a method based on 3D modeling. *Results.* The structure of the information and measurement system for monitoring the parameters of overhead power transmission lines is proposed, which eliminates the key disadvantages inherent in common methods and systems of similar

purpose: no changes are required in the design of overhead lines; parameters that have a direct impact on the reliable and stable operation of overhead lines are monitored. *Conclusions.* The introduction of an information-measuring system for measuring the following parameters is proposed: the angle of inclination of the overhead line wire or the distance and location of the smallest wire sag to the ground; the speed of wind loads; ambient air temperature. The system will allow power grid organizations to improve the reliability and quality of power supply to consumers.

**Keywords:** reliability, overhead power lines, information and measurement system, weather conditions, metrological characteristics

**For citation:** Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A., Artamonov D.V., Zinchenko T.O., Anisimova A.A. Improving the reliability of overhead power transmission lines through the introduction of information and measurement systems for monitoring their parameters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):62–68. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-7

### Введение

Процесс бесперебойной передачи электрической энергии от источника генерации до потребителя (транспорт электроэнергии) является важнейшей задачей функционирования электроэнергетических систем и сетей (ЭЭС). Транспорт электроэнергии в основном осуществляется по воздушным линиям электропередачи (ВЛ), поэтому важнейшей задачей электросетевого комплекса является обеспечение надежного и бесперебойного функционирования ВЛ. Так, например, сегодня в РФ издан ряд нормативно-правовых актов (НПА), направленных на достижение национальных задач развития экономики и социальной сферы<sup>1</sup>. В ПАО «Россети» разработана и принята к исполнению Концепция «Цифровая трансформация 2030», одной из важнейших задач которой является обеспечение бесперебойного транспорта электроэнергии [1].

### Обоснование проблемы обеспечения надежности воздушных линий электропередачи

Высокий уровень аварийности воздушных линий связан с тем, что они являются наиболее повреждаемыми элементами электроэнергетических систем и сетей ввиду своего открытого конструктивного исполнения [2, 3]. Так, например, в последние годы воздушные линии энергосистемы Пензенской области подвергаются воздействиям неблагоприятных погодных явлений. Данные события привели к серьезным повреждениям ВЛ и существенным экономическим затратам. В табл. 1 представлен анализ воздействия неблагоприятных погодных условий (ветровые нагрузки, ледяные дожди и т.д.) на территории Пензенской области в период с 2019 по 2021 г.

Таблица 1

Анализ воздействия неблагоприятных погодных условий на территории Пензенской области в период с 2019 по 2022 г.

Период воздействия неблагоприятного природного явления (ветровые нагрузки)	Напряжение сети, кВ	Максимальная скорость ветра, м/с
1	2	3
16–18 января 2019 г.	0,4–110	16
13–19 февраля 2019 г.	0,4–10	19
11–13 апреля 2020 г.	0,4–110	28
21–23 апреля 2020 г.	6–10	20
11–14 июня 2020 г.	0,4–110	22
08–15 июля 2020 г.	0,4–10	23
08–25 декабря 2020 г.	0,4–110	20
05–21 января 2021 г.	0,4–110	19
07–09 февраля 2021 г.	0,4–10	18
25 апреля 2021 г.	0,4	17

<sup>1</sup> О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы : указ Президента Российской Федерации № 203 от 09.05.2017. ; О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : указ Президента Российской Федерации № 204 от 07.05.2018.

Окончание табл. 1

1	2	3
20–22 апреля 2021 г.	0,4–10	22
30–31 мая 2021 г.	0,4–10	20
27–30 июня 2021 г.	0,4–10	22
12–31 июля 2021 г.	0,4–10	20
03–19 августа 2021 г.	0,4–10	18
29–30 ноября 2021 г.	0,4–10	21
25–26 декабря 2021 г.	0,4–10	23

Основываясь на данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что территория Пензенской области в последние годы становится «опасной ветровой зоной», в которой аварии на воздушных линиях в осенне-зимний период (ОЗП) становятся обычными явлениями для электросетевых организаций.

В связи с этим возрастает актуальность изучения подходов к повышению устойчивости систем электроснабжения [4]. Решение данной задачи осуществляется путем внедрения на объекты электросетевого комплекса информационно-измерительных систем контроля метеорологических и эксплуатационных параметров электроустановок.

#### **Сравнительный анализ методов контроля параметров воздушных линий электропередачи**

На сегодняшний день существует множество методов и устройств мониторинга параметров воздушных линий. Как правило, традиционными методами мониторинга воздушных линий являются следующие: визуальный (пешие осмотры трасс и участков трасс ВЛ), инструментальный и аналитический. Однако данные методы обладают рядом значительных недостатков. Так, недостатком метода визуального осмотра воздушных линий является ограниченность охвата проблемных участков воздушных линий, обусловленная ограниченностью возможностей производственного персонала электросетевых организаций [5].

В табл. 2 представлен сравнительный анализ методов и систем контроля параметров воздушных линий.

Таблица 2

Сравнительный анализ методов и систем контроля параметров воздушных линий

Наименование метода	Достоинства	Недостатки
1	2	3
3D-моделирование	Высокая точность определения геометрических параметров ВЛ и их взаимного расположения	1. Отсутствует возможность исследования параметров ВЛ в неблагоприятных условиях. 2. Отсутствует возможность осуществления контроля в режиме реального времени погодными условиями и отсутствием возможности проведения полного мониторинга в режиме реального времени
Оптический метод	Простота монтажа	1. Высокая стоимость. 2. Неустойчивость к неблагоприятным природным явлениям
Емкостной метод	Низкая погрешность, высокая временная стабильность, простота конструкции	1. Отсутствует возможность контроля положения провода. 2. Отсутствует возможность распределенного контроля гололедообразования по всей трассе ВЛ
Механический метод	–	1. Сложное конструктивное исполнение, обусловленное большим количеством механизмов и деталей. 2. Необходимость дополнительного определения ветровой нагрузки. 3. Большая погрешность. 4. Низкая чувствительность тензодатчиков к изменению механических нагрузок



Окончание табл. 2

1	2	3
Частотный (локационный) метод	1. Возможность размещения аппаратуры только на подстанции (нет необходимости устанавливать на ВЛ какие-либо устройства контроля). 2. Контроль ВЛ в пределах всего участка обследования, а не только одного пролета	1. Невозможность отличить наличие небольшого по толщине гололедного образования на большой длине ВЛ от опасной концентрации льда в отдельных ее пролетах. 2. Зависимость затухания радиолокационного сигнала в проводе ВЛ от погодных условий. 3. Сложность и трудоемкость в обработке сигналов
Термодинамический метод	Возможность определения условий и интенсивности образования ГИО	1. Большой объем математических вычислений. 2. Требуется значительных затрат для реализации осуществления обработки большого количества метеорологических данных
Инклинометрический метод	Простота конструкции и надежность системы	1. Большой объем математических вычислений. 2. Сложность в обработке экспериментальных данных

Анализируя существующие методы контроля параметров ВЛ, можно сделать вывод, что несмотря на имеющиеся достоинства ряда методов и систем, они обладают и недостатками [6–8]. В основном для реализации контроля ВЛ вышеуказанными методами требуется соблюдение следующих условий:

- 1) изменение конструкции линейной арматуры ВЛ;
- 2) проведение большого числа сложных расчетов и составления математических моделей.

Однако усовершенствование устройств, основанных на инклинометрическом и оптическом методе, может быть при учете конструктивных, эксплуатационных и климатических параметров.

### Структура информационно-измерительной системы

Авторами предложен вариант информационно-измерительной системы (ИИС), реализация которой обладает рядом преимуществ, по сравнению с имеющимися методами и системами, а именно [9, 10]:

- ИИС не требует изменения конструкции ВЛ и линейной арматуры;
- ИИС осуществляет контроль параметров без излишних расчетов и не требует составления сложных математических моделей;
- ИИС осуществляет только контроль параметров, оказывающих непосредственное влияние на надежное и устойчивое функционирование ВЛ.

Структурная схема предлагаемой ИИС представлена на рис. 1.

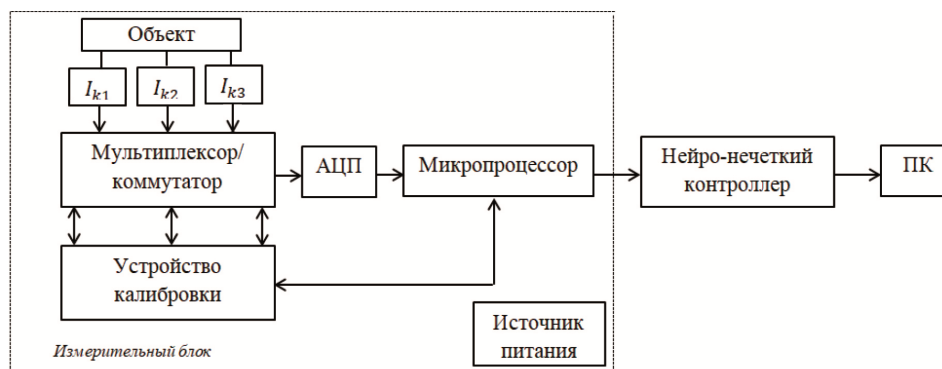


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой ИИС:

ИК1, ИК2, ИК3 – каналы измерения расстояний от провода до земли, скорости ветра, температуры соответственно; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Метрологические характеристики измерительных каналов ИИС представлены в табл. 3.

Таблица 3

Метрологические характеристики измерительных каналов ИИС

Наименование канала	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Пределы допускаемой абсолютной погрешности результатов измерений
Канал измерения расстояния	Длина $l$ , м	0,5–35	$\pm 0,1$
Канал измерения температуры окружающего воздуха	Температура $t$ , °C	–45–+45	$\pm 0,5$
Канал измерения скорости ветровых нагрузок	Скорость $v$ , м/с	0–30	$\pm 1$

### Заключение

Обеспечение надежности систем электроснабжения посредством контроля эксплуатационных параметров воздушных линий в режиме реального времени является актуальной задачей ЭЭС. Устойчивое функционирование воздушных линий ряда энергосистем РФ, в том числе и энергосистемы Пензенской области, зависит от воздействия неблагоприятных природно-климатических явлений (ветровые нагрузки). Анализируя существующие методы контроля параметров ВЛ авторами сделан вывод, что существующие системы контроля эксплуатационных параметров ВЛ наряду с достоинствами обладают и рядом недостатков. Авторами предлагается внедрение информационно-измерительной системы контроля параметров воздушных линий, оказывающих непосредственное влияние на их устойчивое функционирование, а именно:

- угол наклона провода ВЛ или расстояние и места наименьшего провеса провода до земли;
- скорость ветровых нагрузок;
- температура окружающего воздуха.

Указанная информационно-измерительная система позволит электросетевым организациям повысить надежность и качество электроснабжения потребителей.

### Список литературы

1. ПАО «Россети» Концепция «Цифровая трансформация 2030». М., 2018. 31 с.
2. Листюхин В. А., Печерская Е. А. Система контроля параметров воздушных линий электропередачи в режиме реального времени // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4. С. 90–95. doi:10.21685/2227-8486-2021-4-8
3. Листюхин В. А., Печерская Е. А. Информационно-измерительная система контроля параметров воздушных линий электропередачи распределительных сетей 0,4–20 КВ // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике : XVI Всерос. открытая молодежная науч.-практ. конф. Казань, 2022. С. 328–330.
4. Li Z. et al. A resilience-oriented two-stage recovery method for power distribution system considering transportation network // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 135. P. 107497.
5. Дьяков Ф. А. Совершенствование методов и средств мониторинга гололедообразования на линиях электропередачи : дис. ... канд. тех. наук. Ставрополь, 2009. 195 с.
6. Дементьев С. С. Интеллектуальная система мониторинга гололедообразования на воздушных линиях электропередачи : дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2019. С. 142.
7. Listyuhin V. A. et al. System for monitoring the parameters of overhead power lines // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Vol. 2086, № 1. P. 012059.
8. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Мартынов А. В. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового окисления // Радиотехника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. третьей Всерос. молодежной науч. конф. Тамбов, 2018. С. 111–113.
9. Листюхин В. А., Печерская Е. А. Система мониторинга параметров воздушных линий электропередачи для решения задач оперативно-технологического управления // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 6. С. 13–16.

10. Listyukhin V. A. et al. Systematization and monitoring of quality parameters of overhead power transmission lines functioning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 990, № 1. P. 012058.

### References

1. PAO «Rosseti» Kontseptsiya «Tsifrovaya transformatsiya 2030» = PJSC "Rosseti" Concept "Digital transformation 2030". Moscow, 2018:31. (In Russ.)
2. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A. A system for monitoring parameters of overhead power transmission lines in real time. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(4):90–95. (In Russ.). doi:10.21685/ 2227-8486-2021-4-8
3. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A. Information and measurement system for monitoring parameters of overhead power transmission lines of distribution networks of 0,4–20 KV. *Dispetcherizatsiya i upravlenie v elektroenergetike: XVI Vseros. otkrytaya molodezhnaya nauch.-prakt. konf. = Dispatching and management in the electric power industry : XVI All-Russian Open youth scientific and practical conference*. Kazan, 2022:328–330. (In Russ.)
4. Li Z. et al. A resilience-oriented two-stage recovery method for power distribution system considering transportation network. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022;135:107497.
5. D'yakov F.A. *Sovershenstvovanie metodov i sredstv monitoringa golodedoobrazovaniya na liniyakh elektropredachi = Improvement of methods and means of monitoring ice formation on power transmission lines*. PhD dissertation. Stavropol', 2009:195. (In Russ.)
6. Dement'ev S.S. *Intellektual'naya sistema monitoringa golodedoobrazovaniya na vozduzhnykh liniyakh elektropredachi = Intelligent system for monitoring ice formation on overhead power lines*. PhD dissertation. Volgograd, 2019:142. (In Russ.)
7. Listyukhin V.A. et al. System for monitoring the parameters of overhead power lines. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021;2086(1):012059.
8. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Martynov A.V. Application of quality control tools for the analysis of the microarc oxidation process. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vseros. molodezhnoy nauch. konf. = Radioelectronics. Problems and prospects of development : theses of the third All-Russian youth scientific conference*. Tambov, 2018:111–113. (In Russ.)
9. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A. Monitoring system of parameters of overhead transmission lines for solving operational and technological management tasks. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont = Electrical equipment: operation and repair*. 2022;(6):13–16. (In Russ.)
10. Listyukhin V.A. et al. Systematization and monitoring of quality parameters of overhead power transmission lines functioning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;990(1):012058.

### Информация об авторах / Information about the authors

**Владислав Александрович Листюхин**  
аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: vladyan4iklist@yandex.ru

**Vladislav A. Listyukhin**  
Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Екатерина Анатольевна Печерская**  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: peal@list.ru

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

**Дмитрий Владимирович Артамонов**  
доктор технических наук, профессор,  
первый проректор,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

**Dmitriy V. Artamonov**  
Doctor of technical sciences, professor,  
first vice-rector,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**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)

**Анна Антоновна Анисимова**  
студентка,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: an.ryzhova18@gmail.com

**Anna A. Anisimova**  
Student,  
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 21.03.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 26.04.2022**

**Принята к публикации/Accepted 17.05.2022**

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.317.73

doi:10.21685/2307-5538-2022-3-8

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ РЕЗОНАНСНЫМИ ЧЕТЫРЕХЭЛЕМЕНТНЫМИ ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ СХЕМАМИ

А. В. Светлов<sup>1</sup>, Нгок Мань Нгуен<sup>2</sup>

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

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

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Цель работы – разработка средств измерений параметров изделий из пьезоматериалов, представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами. *Материалы и методы.* Используемая методика предусматривает измерение резонансных частот, добротности и максимального напряжения на выходе измерительной цепи с последующим решением системы уравнений, связывающих измеренные параметры с эквивалентными индуктивностью, емкостями и активным сопротивлением исследуемого объекта. *Результаты.* Приведены расчетные соотношения, рассмотрены примеры определения эквивалентных электрических параметров изделий из пьезоматериалов. *Выводы.* Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность применения методики совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей для определения частотных и эквивалентных электрических параметров изделий из пьезоматериалов, представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами.

**Ключевые слова:** изделия из пьезоматериалов, четырехэлементная эквивалентная электрическая схема, резонансная частота, добротность, измерение

**Для цитирования:** Светлов А. В., Нгуен Н. М. Определение параметров изделий из пьезоматериалов, представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 69–75. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-8

## DETERMINATION OF PIEZOMATERIAL PRODUCTS PARAMETERS EXEMPLIFIED BY FOUR-ELEMENT RESONANT EQUIVALENT CIRCUITS

A. V. Svetlov<sup>1</sup>, Ngok Man' Nguen<sup>2</sup>

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

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

**Abstract.** *Background.* The purpose of the study is to develop tools to measure parameters of piezomaterial products represented by four-element resonant equivalent circuits. *Materials and methods.* The technique used provides for the measurement of resonant frequency, quality factor, and maximum voltage at the measuring circuit output, followed by the solution of a system of equations relating the measured parameters with the equivalent inductance, capacitance, and active resistance of the investigated object. *Results.* Calculation ratios are given, and determination of equivalent electrical parameters of piezomaterial products is exemplified. *Conclusions.* The conducted research has confirmed the feasibility of using the method for aggregate measurements of resonant electrical circuit parameters to determine frequency and equivalent electrical parameters of piezomaterial products represented by four-element resonant equivalent circuits.

**Keywords:** piezomaterial products, four-element equivalent electrical circuit, resonant frequency, quality factor, measurement

**For citation:** Svetlov A.V., Nguyen N.M. Determination of piezomaterial products parameters exemplified by four-element resonant equivalent circuits. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):69–75. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-8

Для описания электрических свойств изделий из пьезоматериалов применяется резонансная четырехэлементная эквивалентная электрическая схема [1–3], представленная на рис. 1, где  $C_1$ ,  $L$ ,  $R$  – динамические емкость, индуктивность и сопротивление;  $C_2$  – параллельная емкость.

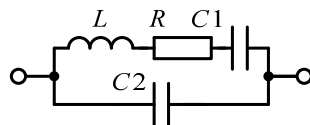


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема изделий из пьезоматериалов

Для определения эквивалентных электрических параметров изделий из пьезоматериалов предлагается использовать методику измерения параметров четырехэлементных резонансных электрических цепей, изложенную в работе [4]. Данная методика построена на основе метода совокупных измерений и предполагает решение систем уравнений, составленных с учетом измеренных значений частотных параметров изделия (частот резонанса и антирезонанса, добротности), а также максимального напряжения на выходе измерительной цепи при резонансной частоте. Полученные системы уравнений решаются относительно искомым эквивалентных электрических параметров изделий (индуктивностей, емкостей, активных сопротивлений), которые в соответствии с принятой эквивалентной электрической схемой объекта отражают поведение объекта в частотной области.

Для измерения параметров изделий из пьезоматериалов разработана, изготовлена и исследована измерительная установка [5] с минимальным числом аналоговых функциональных блоков, позволяющая проводить измерения в диапазоне частот от 20 до 500 кГц.

Структурная схема установки приведена на рис. 2.

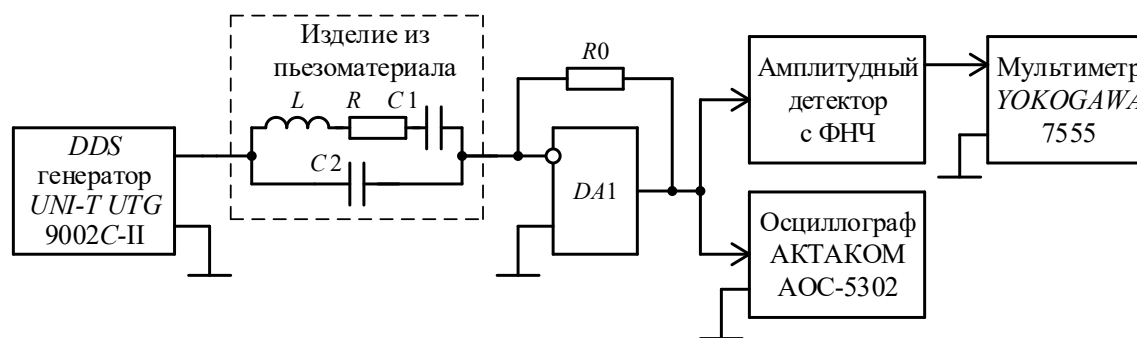


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения параметров изделий из пьезоматериалов

Для построения измерительной цепи (ИЦ) используется отечественный операционный усилитель (ОУ) 544УД2А с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде. При расширении диапазона частот измерительной установки потребуются ОУ с более высоким быстродействием. Исследуемое изделие из пьезоматериала с помощью специального контактирующего устройства включается во входной цепи ОУ с опорным резистором  $R_0$  в цепи его отрицательной обратной связи.

В качестве формирователя синусоидальных тестовых сигналов предложено использовать генератор прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesis – DDS) UNI-T UTG9002C-II [6] с высоким разрешением по частоте 1мкГц в диапазоне частот до 2 МГц и достаточным для решения поставленных задач разрешением по амплитуде 1 мВ. Генератор отличается удобными органами управления, позволяющими оперативно изменять частоту и амплитуду тестового сигнала. При расширении диапазона рабочих частот измерительной установки может быть использован DDS генератор UNI-T UTG9005C-II с диапазоном частот до 5 МГц.

Преобразование амплитуды синусоидального выходного напряжения ИЦ в постоянное напряжение осуществляется амплитудным детектором (АД), описанным в работе [7]. Для уменьшения пульсаций выходного напряжения АД на его выходе включен фильтр нижних частот (ФНЧ).

Для измерения постоянного напряжения на выходе ФНЧ и визуального наблюдения выходного напряжения ОУ используются цифровой мультиметр YOKOGAWA 7555 и цифровой осциллограф АКТАКОМ АОС-5302.

С помощью описанной выше измерительной установки измеряются частотные параметры исследуемого изделия из пьезоматериала: частота последовательного резонанса  $f_0$ , добротность  $Q$  и частота параллельного резонанса (антирезонанса)  $f_1$ , а также максимальное напряжение  $U_{m0}$  на выходе ИЦ на резонансной частоте. Составляется система уравнений, получаемых путем приравнивания математических выражений [4], описывающих резонансные частоты, добротность и максимальное напряжение на выходе ИЦ их измеренным значениям  $f_0, f_1, Q, U_{m0}$ :

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC_1}} = f_0 ; \\ \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC_1}} \cdot \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_2}} = f_1 ; \\ \frac{2\pi L f_0}{R} = Q ; \\ U_0 R_0 \cdot \frac{4\pi^2 f_0^2 C_1^2 R}{(1 - 4\pi^2 f_0^2 LC_1)^2 + 4\pi^2 f_0^2 C_1^2 R^2} = U_{m0} . \end{cases} \quad (1)$$

Решения системы уравнений (1), полученные методом подстановки, в виде формул для вычисления искомых эквивалентных электрических параметров изделия из пьезоматериала  $L, C_1, C_2, R$  имеют вид [4]

$$C_1 = \frac{U_{m0}}{2\pi f_0 U_0 R_0 Q} ; \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{U_{m0} f_0}{2\pi U_0 R_0 Q (f_1^2 - f_0^2)} ; \quad (3)$$

$$L = \frac{U_0 R_0 Q}{2\pi f_0 U_{m0}} ; \quad (4)$$

$$R = \frac{U_0 R_0}{U_{m0}} . \quad (5)$$

Применение метода совокупных измерений позволяет предельно упростить аппаратную часть средства измерения параметров изделий из пьезоматериалов, сократить число последовательно выполняемых аналоговых преобразований измеряемых величин. Предлагаемое техническое решение предполагает только две аналоговые процедуры: преобразование сопротивления исследуемого объекта в напряжение и определение амплитуды синусоидального напряжения на выходе ИЦ на частотах, соответствующих характерным точкам АЧХ этой ИЦ. Все последующие действия по составлению и решению системы уравнений в соответствии с методом совокупных измерений выполняются программным способом. Переход от аналоговых преобразований измеряемых величин к цифровой обработке выходных сигналов ИЦ способствует повышению точности средств измерений за счет предотвращения накопления случайных погрешностей при последовательном выполнении нескольких аналоговых преобразований [8].

Полученные в результате моделирования ИЦ и АД относительные погрешности определения параметров элементов четырехэлементной эквивалентной схемы исследуемого изделия из пьезоматериала не превышают  $\pm 2\%$ .

Рассмотренная методика была применена для исследования ряда образцов пьезоматериалов (10 экземпляров). Во всех измерительных экспериментах с образцами изделий из пьезоматериала в качестве опорного сопротивления  $R_0$  использовался прецизионный резистор С2-29В с сопротивлением  $R_0 = 10,2$  кОм. Резонансные частоты у разных образцов изменялись в диапазоне от 180 до 310 кГц. В качестве примера для одного из образцов выполнено подробное измерение АЧХ измерительной цепи (ИЦ). По результатам измерений в программе MathCAD созданы массивы данных в формате: частота – амплитуда выходного напряжения ИЦ. Построены графики фрагментов АЧХ, приведенные на рис. 3.

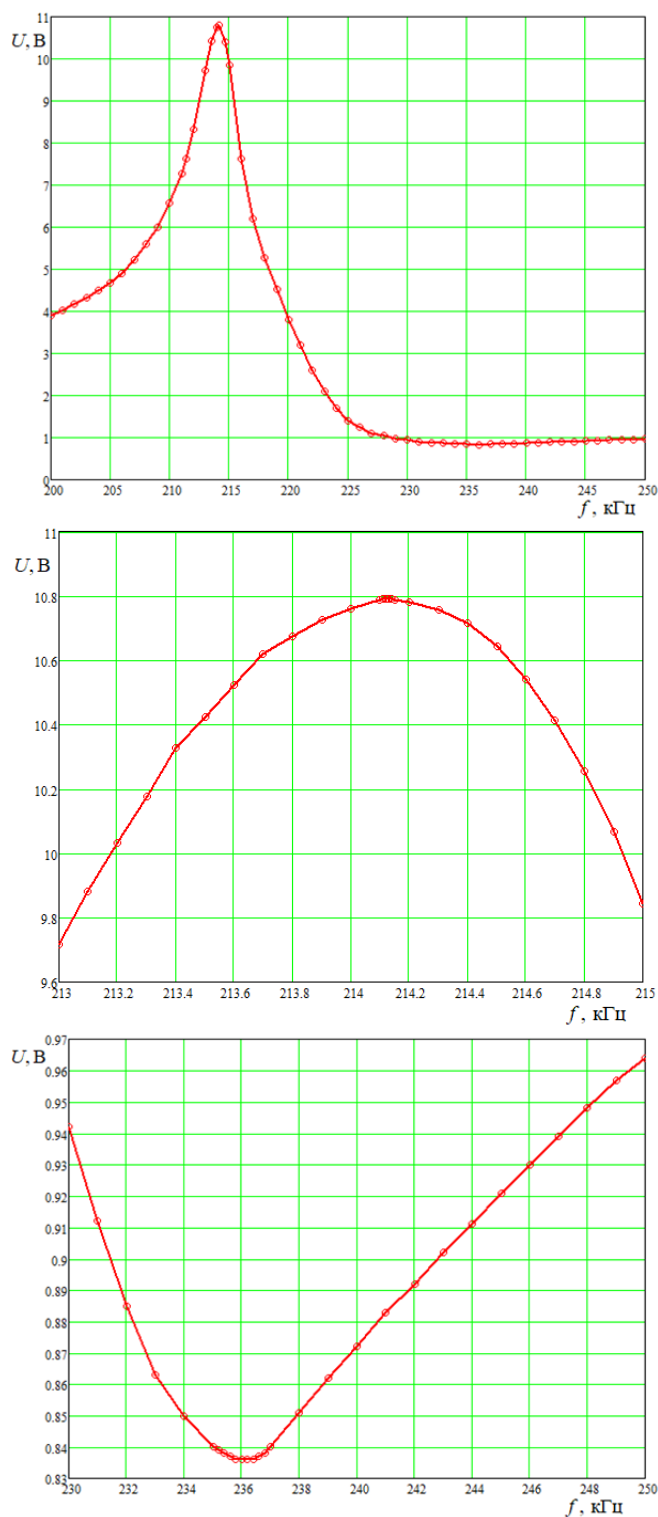


Рис. 3. АЧХ ИЦ с образцом пьезоматериала и фрагменты АЧХ в областях резонанса и антирезонанса



В табл. 1 для трех образцов пьезоматериалов приведены результаты измерений их частотных параметров и вычислений по ним эквивалентных электрических параметров.

Таблица 1

Параметры образцов пьезоматериалов

Показатели	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Результаты измерений частотных параметров			
$U_0$ , мВ	140,0	110,0	150,0
$f_0$ , кГц	214,12	287,61	286,13
$U_{m0}$ , В	10,79	8,82	9,550
$Q$	46,15	75,29	36,47
$f_1$ , кГц	236,2	300,17	279,51
Результаты вычислений эквивалентных электрических параметров			
$C_1$ , пФ	121,7	57,8	95,5
$C_2$ , пФ	561,2	647,4	2104,3
$L$ , мГн	4,54	5,30	3,26
$R$ , Ом	132,3	127,2	160,2

Особенно сложно измерять частотные параметры таких изделий из пьезоматериалов, как кварцевые резонаторы, используемые для построения высокостабильных генераторов электрических колебаний и узкополосных фильтров. Если у пьезоматериалов, предназначенных при построении датчиков давления, актюаторов, элементов гидроакустических антенных решеток, излучателей ультразвуковых колебаний, пьезораспылителей жидкостей и т.п., добротность может иметь значения от нескольких десятков до нескольких сотен, то у кварцевых резонаторов добротность достигает нескольких десятков тысяч [9]. Для поиска и измерения частоты последовательного резонанса, а также частот, соответствующих уровню 0,707 от максимальной амплитуды выходного напряжения измерительной цепи на резонансной частоте, требуется очень высокое (до сотых долей герц) разрешение по частоте. Такое высокое разрешение способны обеспечить только DDS генераторы, в частности, используемый автором генератор UNI-T UTG9002C-II [6].

При схемотехническом моделировании электронных схем, в состав которых входят низкочастотные (например, часовые 32,768 кГц) кварцевые резонаторы, следует иметь в виду некоторую «необычность» значений эквивалентных электрических параметров резонатора. Для отображения высокой (десятки тысяч) добротности при низкой резонансной частоте  $f_0$  эквивалентные электрические параметры резонатора, получаемые путем расчета по измеренным частотным параметрам, или заимствованные из библиотек Spice-моделей электронных компонентов программ схемотехнического моделирования, имеют следующие значения (обозначения в соответствии с эквивалентной схемой рис. 1):

- индуктивность  $L$  – сотни и тысячи генри;
- емкость  $C_1$  – сотые и тысячные доли пикофарад;
- емкость  $C_2$  – единицы пикофарад;
- сопротивление  $R$  – единицы и десятки килоом.

Эквивалентные электрические схемы с такими параметрами позволяют адекватно отображать частотные характеристики низкочастотных кварцевых резонаторов.

Например, в библиотеке Spice-моделей электронных компонентов программы OrCAD [10] приводится следующая модель часового кварцевого резонатора с частотой последовательного резонанса  $f_0 = 32,768$  кГц, добротностью  $Q = 81780$ , частотой параллельного резонанса  $f_1 = 32,8152$  кГц:

```
* 32768 hertz watch crystal, XY cut, series resonant, Q=81780
.subckt QZS32768 1 2
lqz 1 11 lmod 4448.72259
.model lmod ind(tc2 = 8.68e-8)
cs 11 12 5.30279780e-015
rqz 12 2 11.2k
cp 1 2 1.84pf
.ends
```

Автором с помощью измерительной установки были исследованы несколько экземпляров часовых кварцевых резонаторов (см. рис. 2). Подтверждена возможность определения частотных и эквивалентных электрических параметров резонаторов.

Пример: при исследовании одного из кварцевых резонаторов использовались следующие исходные данные:

– сопротивление прецизионного опорного резистора  $R_0 = 75,72$  кОм;

– амплитуда тестового синусоидального напряжения  $U_0 = 1,40$  В.

Получены следующие результаты измерений:

– частота последовательного резонанса  $f_0 = 32,7575$  кГц;

– максимальное напряжение на выходе ИЦ  $U_{m0} = 10,380$  В;

– добротность:  $Q = 54595,8$ ;

– частота параллельного резонанса  $f_1 = 32,8023$  кГц.

По результатам измерений частотных параметров вычислены эквивалентные электрические параметры кварцевого резонатора:

– емкость  $C_1 = 8,714 \cdot 10^{-15}$  Ф;

– емкость  $C_2 = 3,184$  пФ;

– индуктивность  $L = 2709,0$  Гн;

– сопротивление  $R = 10,213$  кОм.

Полученные в результате измерений значения параметров часового кварцевого резонатора соответствуют типовым значениям параметров резонаторов данного типа [10, 11].

В качестве заключения можно отметить, что проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность применения методики совокупных измерений параметров резонансных электрических цепей для определения частотных и эквивалентных электрических параметров изделий из пьезоматериалов [4], представляемых резонансными четырехэлементными эквивалентными схемами.

### Список литературы

1. Головин В. А., Каплунов И. А., Малышкина О. В. [и др.]. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. М. : Техносфера, 2013. 272 с.
2. Пьезоэлектрические резонаторы : справочник / под ред. П. Е. Кандыбы, П. Г. Позднякова. М. : Радио и связь, 1992. 392 с.
3. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрических резонаторов. АО Пьезо – Производство кварцевых генераторов и резонаторов. 2021. URL: [https://www.oaopiezo.com/theory\\_6.html](https://www.oaopiezo.com/theory_6.html)
4. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Измерение параметров резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 83–92.
5. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Стенд для исследования резонансных электрических цепей // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2020») : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. С. 10–12.
6. Генератор сигналов UNI-T UTG9002C-II. Технические характеристики. URL: [https://supereyes.ru/catalog/waveform\\_generator/uni\\_t\\_utg9002c\\_ii/](https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/)
7. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Амплитудный детектор для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 31–37.
8. Колдов А. С. Оценивание погрешностей измерительных преобразователей с последовательным выполнением аналоговых преобразований измеряемых величин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2018». Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. С. 20–23.
9. Справочный материал по пьезотехнике. Добротность пьезоэлектрических резонаторов. АО Пьезо – Производство кварцевых генераторов и резонаторов. 2021. URL: [https://www.oaopiezo.com/theory\\_8.html](https://www.oaopiezo.com/theory_8.html)
10. 32768 hertz watch crystal. Library of quartz crystals. Copyright OrCAD, Inc. 1998 All Rights Reserved. URL: <http://robustdesignconcepts.com/-files/pspice/libs/xtal.lib>
11. Electronics Designers' Handbook / ed. by L. J. Giacoletto. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Book Co., 1977. P. 16–31. URL: <https://catalogue.nla.gov.au/Record/704861>

## References

1. Golovnin V.A., Kaplunov I.A., Malyshkina O.V. et al. *Fizicheskie osnovy, metody issledovaniya i prakticheskoe primeneniye p'ezomaterialov = Physical foundations, research methods and practical application of piezomaterials*. Moscow: Tekhnosfera, 2013:272. (In Russ.)
2. Kandyby P.E., Pozdnyakova P.G. (eds.). *P'ezoelektricheskie rezonatory: spravochnik = Piezoelectric resonators : handbook*. Moscow: Radio i svyaz', 1992:392. (In Russ.)
3. *Ekvivalentnaya elektricheskaya skhema p'ezoelektricheskikh rezonatorov. AO P'ezo – Proizvodstvo kvartsevykh generatorov i rezonatorov = Equivalent electrical circuit of piezoelectric resonators. JSC Piezo – Production of quartz oscillators and resonators*. 2021. (In Russ.). Available at: [https://www.oaopiezo.com/theory\\_6.html](https://www.oaopiezo.com/theory_6.html)
4. Svetlov A.V., Nguen N.M. Measurement of parameters of resonant electrical circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2021;(3):83–92. (In Russ.)
5. Svetlov A.V., Nguen N.M. Stand for the study of resonant electrical circuits. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2020»): materialy XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky Readings – 2020") : materials of the XII International Scientific and Technical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:10–12. (In Russ.)
6. *Generator signalov UNI-T UTG9002C-II. Tekhnicheskie kharakteristiki = Signal generator UNI-T UTG9002C-II. Technical specifications*. (In Russ.). Available at: [https://supereyes.ru/catalog/waveform\\_generator/uni\\_t\\_utg9002c\\_ii/](https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/)
7. Svetlov A.V., Nguen N.M. An amplitude detector for constructing measuring instruments for parameters of resonant electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(2):31–37. (In Russ.)
8. Koldov A.S. Estimation of errors of measuring transducers with sequential execution of analog transformations of measured values. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2018» = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information : materials of the International Scientific and Technical conf. "Shlyandinsky readings – 2018"*. Penza: Izd-vo PGU, 2018:20–23. (In Russ.)
9. *Spravochnyy material po p'ezotekhnike. Dobrotnost' p'ezoelektricheskikh rezonatorov. AO P'ezo – Proizvodstvo kvartsevykh generatorov i rezonatorov = Reference material on piezotechnics. The Q-factor of piezoelectric resonators. JSC Piezo – Production of quartz oscillators and resonators*. (In Russ.). 2021. Available at: [https://www.oaopiezo.com/theory\\_8.html](https://www.oaopiezo.com/theory_8.html)
10. *32768 hertz watch crystal. Library of quartz crystals. Copyright OrCAD, Inc. 1998 All Rights Reserved*. Available at: <http://robustdesignconcepts.com/-files/pspice/libs/xtal.lib>
11. Giacoletto L.J. (ed.). *Electronics Designers' Handbook. 2nd ed.* New York: McGraw-Hill Book Co., 1977:16–31. Available at: <https://catalogue.nla.gov.au/Record/704861>

## Информация об авторах / Information about the authors

**Анатолий Вильевич Светлов**

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

**Anatoliy V. Svetlov**

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

**Нгок Мань Нгуен**

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

**Ngok Man' Nguen**

Postgraduate student,  
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 02.04.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.05.2022**

**Принята к публикации/Accepted 13.06.2022**

УДК 53.08  
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-9

## МЕТОД «РЕЗОНАНС–АНТИРЕЗОНАНС» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ

А. Е. Журина<sup>1</sup>, Н. С. Емельянов<sup>2</sup>, Е. А. Печерская<sup>3</sup>, А. В. Фимин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>gelya.zhurina@mail.ru, <sup>2</sup>emelianoff.nikita@gmail.com, <sup>3</sup>pea1@list.ru, <sup>4</sup>mr.l0tus@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Пьезоэлектрические материалы являются перспективными для применения в датчиках, для контроля динамических процессов в качестве первичных преобразователей информации измерительных и управляющих систем. Пьезомодуль позволяет формализовать взаимосвязи между диэлектрическими и упругими свойствами материала, что указывает на актуальность исследования методов его определения. *Материалы и методы.* Исследованы электрофизические параметры образцов материалов с пьезомягкой и пьезожесткой модой методом «резонанс–антирезонанс». *Результаты.* Выполнен анализ применимости метода «резонанс–антирезонанс» для образцов с пьезомягкой и пьезожесткой модой, при котором в образцах возбуждаются соответствующие образцу моды колебаний. По измеренным значениям характерных частот, а также емкости образцов рассчитаны величины всех упругих пьезоэлектрических и диэлектрических констант. *Выводы.* Подтверждена применимость метода «резонанс–антирезонанс» для определения электрофизических параметров пьезоэлектриков как у материалов с пьезомягкими модами, так и с пьезожесткими. Показано, что полный набор констант, полученный для образца одной формы, отличается от образца из того же материала, но другой формы. Это обусловлено флуктуацией свойств при переходе от пьезоэлемента одной геометрии к пьезоэлементу с другой геометрией из-за разного уровня их поляризации, разброса степени их структурной неоднородности.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрик, метод «резонанс–антирезонанс», пьезоэлектрические константы, комплексная проводимость, частота

**Для цитирования:** Журина А. Е., Емельянов Н. С., Печерская Е. А., Фимин А. В. Метод «резонанс–антирезонанс» для определения электрофизических параметров пьезоэлектриков // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 76–82. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-9

## THE "RESONANCE–ANTIRESONANCE" METHOD FOR DETERMINING THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF PIEZOELECTRICS

A.E. Zhurina<sup>1</sup>, N.S. Emelyanov<sup>2</sup>, E.A. Pecherskaya<sup>3</sup>, A.V. Fimin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup>gelya.zhurina@mail.ru, <sup>2</sup>emelianoff.nikita@gmail.com, <sup>3</sup>pea1@list.ru, <sup>4</sup>mr.l0tus@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Piezoelectric materials are promising for use in sensors, for monitoring dynamic processes as primary information converters of measuring and control systems. The piezomodule makes it possible to formalize the relationship between the electrical and elastic properties of the material, which indicates the relevance of the study of methods for its determination. *Materials and methods.* The electrophysical parameters of samples of materials with piezo-soft and piezo-hard modes are investigated by the "resonance–antiresonance" method. *Results.* The analysis of the applicability of the "resonance–antiresonance" method for samples with piezo-soft and piezo-hard modes, in which the oscillation modes corresponding to the sample are excited in the samples, is performed. The values of all elastic piezoelectric and dielectric constants are calculated from the measured values of the characteristic frequencies, as well as the capacitance of the samples. *Conclusions.* The applicability of the "resonance–antiresonance" method for determining the electrophysical parameters of piezoelectrics both in materials with piezo-soft modes and with piezo-rigid ones is confirmed. It is shown that the complete set of constants obtained for a sample of one form differs from a sample of the same material, but of a different form. This is due to the fluctuation of properties during the transition from a piezoelectric element of one geometry to a piezoelectric element with another geometry due to the different level of their polarization, the spread of the degree of their structural heterogeneity.

**Keywords:** piezoelectric, the method of "resonance-antiresonance", piezoelectric constants, complex conductivity, frequency

**For citation:** Zhurina A.E., Emelyanov N.S., Pecherskaya E.A., Fimin A.V. The "resonance-antiresonance" method for determining the electrophysical parameters of piezoelectrics. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):76–82. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-9

Перспективные пьезоэлектрические материалы находят широкое применение в пьезоэлектрических преобразователях и датчиках, для контроля динамических процессов в качестве первичных преобразователей информации измерительных и управляющих систем [1]. Для применения пьезоэлектрических материалов в измерительной технике важно сочетание высокой эффективности со стабильностью характеристик при внешних воздействиях [2]. Свойства пьезоэлектрических кристаллов и пьезоэлектриков на основе различных химических соединений зависят от большого набора взаимосвязанных параметров, к которым относится температура Кюри, величины пьезоэлектрических, упругих и диэлектрических констант, стабильность от температуры, давления и других влияющих факторов [3]. Это указывает на необходимость системного выбора пьезоэлектрического материала, наилучшим образом подходящего для использования в измерительной технике. Поэтому актуальна задача изучения методов исследования электрофизических параметров пьезоэлектриков.

В электрическом поле диэлектрикам присущи различные электромеханические эффекты, так как при деформации кристалла в нем возникают упругие напряжения. Физической причиной электромеханических эффектов являются микроскопические смещения электрических зарядов в приложенном электрическом поле, поскольку электромеханические эффекты сопровождают электрическую поляризацию. Анизотропия пьезоэлектрических материалов приводит к тому, что для описания их электромеханических свойств необходимо использовать несколько компонент пьезомодулей [4]. Пьезомодуль является важным электрофизическим параметром пьезоматериала, с помощью которого описывается взаимосвязь между диэлектрическими и упругими свойствами материала. Помимо пьезомодуля существует ряд других, не менее важных параметров. Наиболее распространен следующий набор параметров пьезоматериала [5]:

$d(d_{33}, d_{31})$  – пьезомодули (по направлению рабочих деформаций);

$K_{эм}(k_{33}, k_{31})$  – коэффициенты электромеханической связи характеризуют эффективность преобразования электрической энергии, подводимой к материалу, в механическую;

$Y_{ij}$  – модуль Юнга определяет упругие и резонансные свойства материала;

$Q_m$  – характеризует потери энергии в материале на внутреннее трение, определяет эффективную ширину полосы пропускания, влияет на степень затухания колебательных процессов;

$\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость определяет полное сопротивление пьезоэлемента, характеризует диэлектрические и в конечном итоге емкостные свойства пьезоэлемента;

$\text{tg}\delta$  и  $\text{tg}\sigma$  – тангенсы углов диэлектрических и механических потерь характеризуют диэлектрические и механические потери в материале;

Известны различные методы определения констант упругости пьезоматериалов, которые целесообразно разделить на следующие группы: динамические методы, статические и квазистатистические [6].

Статистическими и квазистатическими методами обычно определяют только пьезомодули  $d_{31}$ ,  $d_{31}$ . Отличие этих методов от динамических методов заключается в том, что у первых частота статического и квазистатического нагружения испытываемых образцов ограничена сверху единицами Герц. Динамические методы позволяют определить ряд констант пьезоэлектрика с достаточно высокой точностью. В частности, к ним относится метод резонансных спектров, с помощью которого можно определить ряд упругих резонансов пьезоматериалов в сегнето- или парафазе в температурном диапазоне, включающем в себя температуру, близкую к температуре фазового перехода. Наибольшее распространение для сегнетоэлектриков и пьезоактивных материалов получил метод резонанса-антирезонанса [6]. Данный метод позволяет определить полный набор констант пьезоэлектрического материала. При использовании метода «резонанса–антирезонанса» (Р-А) в образцах возбуждают соответствующие образцу моды колебаний. По измеренным значениям характерных частот, а также емкости образцов рассчитывают величины всех упругих пьезоэлектрических и диэлектрических констант. В работе [7] из-

ложены сведения о методах и средствах измерения констант пьезокерамики и параметров пьезорезонатора. Подробно рассмотрен метод «резонанс – антирезонанс», на нескольких модах:

- низкочастотные пьезомягкие моды:
  - колебания пьезокерамических колец с аксиальной поляризацией;
  - сферически симметричные колебания тонкой сферической пьезокерамической оболочки;
  - продольные колебания стержня в поле, перпендикулярном его длине;
  - диски с радиальными колебаниями.
- высокочастотные пьезомягкие моды:
  - толщинные колебания пластин в электрическом поле, перпендикулярном толщине.
- низкочастотные пьезожесткие моды:
  - продольные колебания стержня в поле параллельном его длине.
- высокочастотные пьезожесткие моды:
  - тонкая пластинка с продольными колебаниями по толщине;
  - пластинка со сдвиговыми колебаниями по толщине.

Моды в образце можно определить резонансным методом, в котором возбуждаются определенные акустические моды собственных колебаний образца [8]. В работе [9] при заданной нагрузке рассмотрена задача о вынужденных колебаниях для различных значений частоты. Переход через собственную частоту обнаруживается по изменению фазы всех характеристик. Таким образом, обычно фиксируется широкий интервал, содержащий собственную частоту. Последующее дробление этого интервала позволяет найти с высокой точностью, как саму собственную частоту, так и характеристики соответствующей формы колебаний.

Математической моделью, используемой в методе, служат выражения для комплексной проводимости или сопротивления, полученные из решения электромеханической задачи для случаев одномерных колебаний пьезоэлемента. Основным допущением модели является пренебрежение всеми видами потерь энергии [7]. Экспериментально метод основан на измерении частот, по которым рассчитываются упругие константы и коэффициент электромеханической связи. Для расчета пьезоконстант проводятся измерения низко- или высокочастотной емкости, определяющей диэлектрические свойства материала. Последние наряду с величинами модуля комплексной проводимости на резонансе используются для определения механической добротности.

В сегнетоэлектриках типа смещения ангармоническое взаимодействие между фононами является слабым, что подтверждается малостью констант затухания для мягких мод и расчетами ангармонических поправок к частотам мягких фононных мод пьезоматериалов [10]. Выбор независимых механических переменных определяется механическими условиями в направлениях, поперечных колебательному движению. В случае низкочастотных мод элементарный объем считается свободным в поперечном направлении. На высокочастотных модах элементарный объем зажат в поперечном направлении одномерного линейного или планарного колебательного движения. Электрические граничные условия определяются расположением поверхностей пьезоэлектриков и их формой. Для пьезоэлектрических мягких (пьезомягких) мод поверхности электродов параллельны направлению колебаний.

Удобным способом описания метода «резонанс – антирезонанс» представляется использование классификации, которая выполнена в соответствии с электрическими и механическими граничными условиями. Можно определить пьезоконстанты, исходя из комплексной проводимости  $Y$  для пьезомягких мод:

$$Y = j\omega \left[ 1 + \frac{k^2}{1 - k^2} I_d(\varphi) \right], \quad (1)$$

где  $I_d(\varphi)$  – функция, определяющая динамические свойства пьезоматериала;  $k$  – коэффициент связи, или из комплексного сопротивления  $Z$  для пьезожестких мод [7] согласно следующему выражению:

$$z = \frac{1}{j\omega C_0} \left[ 1 - k^2 I_d(\varphi) \right]. \quad (2)$$

Для определения констант на пьезомягких модах используется условие антирезонанса при  $Y = 0$ , для определения констант на пьезожестких модах применено условие  $Z \rightarrow \infty$ .

Для примера рассмотрим образец в форме таблетки, имеющей природу низкочастотных мод. Тогда комплексная проводимость будет определяться согласно выражению (1). В условии антирезонанса  $Y = 0$ , отсюда следует

$$1 + \frac{k^2}{1 - k^2} I_D(\varphi) = 0. \quad (3)$$

При определении коэффициента связи воспользуемся заменой [7]

$$\frac{f_p}{f_s} = 1 + \frac{\Delta f}{f_s}, \quad (4)$$

где  $f_s$  – частота динамического (последовательного) резонанса,  $f_p$  – частота параллельного резонанса (антирезонансная частота),  $\Delta f = f_p - f_s$ . Тогда коэффициент связи будет равен

$$k = \sqrt{1 + \frac{\Delta f}{f_s}}, \quad (5)$$

пьезомодуль можно определить из коэффициента связи

$$d_{31} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Delta f}{f_s}\right) S_{11}^E (1 - \sigma) \epsilon_{33}^T}, \quad (6)$$

где  $S_{11}^E$  – упругая константа материала;  $\epsilon_{33}^T$  – диэлектрическая константа;  $\sigma$  – коэффициент Пуассона.

В образце в форме таблетки, имеющего пьезожесткую моду, комплексная проводимость будет определяться по формуле (2). В условии антирезонанса  $Z \rightarrow \infty$ , отсюда следует

$$1 - k^2 I_D(\varphi) = 0. \quad (7)$$

При определении коэффициента связи воспользуемся заменой [7], тогда коэффициент связи будет равен

$$k^2 = \left( \frac{\pi f_s}{2 f_p} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\pi \Delta f}{2 f_p} \right). \quad (8)$$

Пьезоэлектрическая константа будет равна

$$h_{33} = 2 f_p \sqrt{\frac{m}{C^S} \left( \frac{\pi f_s}{2 f_p} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\pi \Delta f}{2 f_p} \right)}, \quad (9)$$

где  $m$  – масса образца;  $C^S$  – электрическая емкость образца,  $C^S = \frac{\epsilon_{33}^S \pi r^2}{t}$ , где  $r$  – радиус, а  $t$  – толщина образца. Тогда выражение для пьезоэлектрической константы будет иметь следующий вид:

$$h_{33} = 2 f_p \sqrt{\frac{m}{\frac{\epsilon_{33}^S \pi r^2}{t}} \left( \frac{\pi f_s}{2 f_p} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\pi \Delta f}{2 f_p} \right)}. \quad (10)$$

Для проверки метода использованы данные справочника [11] для различных пьезокерамических материалов. Получившиеся данные представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

## Образцы с пьезомягкой модой

Образец	$-d_{31}(10^{-12})$ , Кл/Н	$-d_{31}^*(10^{-12})$ , Кл/Н	$\epsilon_{33}^r(10^{-12})$ , Ф/м	$S^E(10^{-12})$ , м <sup>2</sup> /Н	$\sigma$	$f_s$ , кГц	$f_p$ , кГц
ЦТС-19	175	177	192	15,8	0,38	2,5768	0,6768
ЦТС-24М	100	109	107	13,0	0,31	2,6234	0,6554
VA800	123	119	147	12,8	0,30	2,6304	0,5404
ЦТБС-3	158	161	263	11,1	0,30	2,6304	0,6122
ПКВ-820	110	113	128	12,3	0,32	2,6165	0,3165

Примечание:  $d_{31}$  – пьезомодуль, полученный по формуле (6).

Таблица 2

## Образцы с пьезожесткой модой

Образец	$h_{33}$	$h_{33}^*$	$\epsilon_{33}^s$ , Ф/м	$\sigma$	$f_s$ , кГц	$f_p$ , кГц
DL-31	18,8	17,89	265	0,22	3,0545	0,1275
DL-40	52,5	53,61	210	0,29	3,0970	0,1940
DL-43	27,9	25,93	550	0,31	3,1131	0,2131
DL-45	23,6	24,32	680	0,32	3,1212	0,2312
DL-47	24,6	22,17	870	0,31	3,1131	0,3101

Примечание:  $h_{33}$  – пьезоэлектрическая константа, полученная по формуле (10), при расчетах масса бралась равной  $m = 0,016$  кг, радиус образца  $r = 0,02$  м, толщина  $t = 0,001$  м.

В процессе проверки формулы (10) возникла задача подбора размера и веса образцов так, чтобы пьезоэлектрические константы были близки по значениям. При подсчете констант методом «резонанс–антирезонанс» значения, полученные для образца одной формы, будут отличаться от значений пьезокерамического образца других размеров.

Таким образом, изложенный метод является рабочим, он позволяет выполнять определение констант как у материалов с пьезомягкими модами, так и с пьезожесткими. Однако проверка показала, что константы у материалов с пьезожесткими модами методом «резонанс–антирезонанс» определять сложнее, несмотря на это, метод зарекомендовал себя хорошо, к тому же большинство пьезокерамических материалов имеют пьезомягкую моду.

Метод подтвержден ГОСТ Р 8.936–2017<sup>1</sup>, в котором пьезоэлектрический модуль определяется по формуле

$$|d_{31}| = \frac{0,188K_p 10^{-5}}{rf_s} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^r / \epsilon_0}{\rho}}, \quad (11)$$

где  $K_p$  – показатель эффективности преобразования электрической энергии в механическую энергию или преобразования механической в электрическую,  $\rho$  – измеренная плотность образца, определяемая методом гидростатического взвешивания в октане.

### Заключение

Рассмотренный метод «резонанс–антирезонанс» может быть использован для получения полного набора электрофизических параметров пьезоэлектрика. Но полный набор констант, полученный для образца одной формы, будет отличаться от образца из того же материала, но другой формы. Это происходит потому, что флуктуация свойств при переходе от пьезоэлемента одной геометрии к пьезоэлементу с другой геометрией значительна из-за разного уровня их поляризации, разброса степени их структурной неоднородности. В результате константы, рассчитанные по резонансным частотам соответствующих мод колебаний таких пьезоэлементов, являются характеристиками того типа пьезоэлементов, на которых измеря-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 8.936–2017. Государственная система обеспечения единства измерений. Пьезокерамические материалы. Диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие характеристики при температуре 25 °С.



лись частоты резонансов. Поэтому полный набор констант пьезокерамики, рассчитываемый по методу «резонанс–антирезонанс», существенно отличается от полного набора материальных констант конкретного состава пьезокерамики. В этом смысле и заключается несовместимость значений набора констант пьезоэлементов разной геометрии и материальных констант конкретного состава пьезокерамики, а также недостоверность результатов, полученных методом «резонанс–антирезонанс».

### Список литературы

1. Богуш М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. М. : Техносфера, 2014. 312 с.
2. Печерская Е. А. Метрологические аспекты исследования активных диэлектриков для микро- и наноиндустрии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 41–44.
3. Печерская Е. А., Соловьев В. А., Метальников А. М. [и др.]. Контроль временной нестабильности диэлектрических параметров сегнетоэлектриков // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2013. № 2. С. 84–88.
4. Рез И. С., Поплавко Ю. М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М. : Радио и связь, 1989. 288 с.
5. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В. [и др.]. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб. : Университет ИТМО, 2017. 134 с.
6. Копьян В. А., Соловьев А. Н., Шевцов С. Н. Методы и алгоритм определения полного набора совместимых материальных констант пьезокерамических материалов. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2008. 144 с.
7. Ганопольский В. В., Касаткин Б. А., Легуша Ф. Ф. [и др.]. Пьезокерамические преобразователи : справочник. Л. : Судостроение, 1984, 256 с.
8. Гайдуков Ю. П., Данилова Н. П., Сапожников О. А. Моды колебаний изотропного диска, слабо зависящие от его толщины // Акустический журнал. 1999. Т. 45, № 2. С. 195–203.
9. Гринченко В. Т., Мелешко В. В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Киев : Наук. думка, 1981. 284 с.
10. Квятковский О. Е. Квантовые эффекты в виртуальных и низкотемпературных сегнетоэлектриках (Обзор) // Физика твердого тела. 2001. Т. 43, вып. 8
11. Справочник пьезокерамических материалов различных фирм. Зеленоград : НИИ «Элпа».

### References

1. Bogush M.V. *Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektrouprugikh modeley = Design of piezoelectric sensors based on spatial electro-elastic models*. Moscow: Tekhnosfera, 2014:312. (In Russ.)
2. Pecherskaya E.A. *Metrological aspects of research of active dielectrics for micro- and nanoindustry. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem technology*. 2007;(7):41–44. (In Russ.)
3. Pecherskaya E.A., Solov'ev V.A., Metal'nikov A.M. et al. Control of time instability of dielectric parameters of ferroelectrics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika = Izvestia of higher educational institutions. Electronics*. 2013;(2):84–88. (In Russ.)
4. Rez I.S., Poplavko Yu.M. *Dielektriki. Osnovnye svoystva i primeneniya v elektronike = Basic properties and applications in electronics*. Moscow: Radio i svyaz', 1989:288. (In Russ.)
5. Bobtsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V. et al. *Ispolnitel'nye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy = Actuators and systems for micro-displacements*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2017:134. (In Russ.)
6. Kop'yan V.A., Solov'ev A.N., Shevtsov S.N. *Metody i algoritm opredeleniya polnogo nabora sovmeshtimyykh material'nykh konstant p'ezokeramicheskikh materialov = Methods and algorithm for determining the complete set of compatible material constants of piezoceramic materials*. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuFU, 2008:144. (In Russ.)
7. Ganopol'skiy V.V., Kasatkin B.A., Legusha F.F. et al. *P'ezokeramicheskie preobrazovateli: spravochnik = Piezoceramic converters : handbook*. Leningrad: Sudostroenie, 1984:256. (In Russ.)
8. Gaydukov Yu.P., Danilova N.P., Sapozhnikov O A. Modes of oscillations of an isotropic disk, weakly depending on its thickness. *Akusticheskiy zhurnal = Acoustic Journal*. 1999;45(2):195–203. (In Russ.)
9. Grinchenko V.T., Meleshko V.V. *Garmonicheskie kolebaniya i volny v uprugikh telakh = Harmonic oscillations and waves in elastic bodies*. Kiev: Nauk. dumka, 1981:284. (In Russ.)
10. Kvyatkovskiy O.E. Quantum effects in virtual and low-temperature ferroelectrics (Review). *Fizika tverdogo tela = Solid state Physics*. 2001;43(8). (In Russ.)
11. *Spravochnik p'ezokeramicheskikh materialov razlichnykh firm = Directory of piezoceramic materials of various companies*. Zelenograd: NII «Elpa». (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Ангелина Евгеньевна Журина**

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

**Angelina E. Zhurina**

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

**Никита Сергеевич Емельянов**

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

**Nikita S. Emelyanov**

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

**Екатерина Анатольевна Печерская**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: peal@list.ru

**Ekaterina A. Pecherskaya**

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

**Андрей Владимирович Фимин**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: mr.l0tus@mail.ru

**Andrey V. Fimin**

Postgraduate student,  
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 25.03.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 26.04.2022**

**Принята к публикации/Accepted 23.05.2022**

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

УДК 628.946.2

doi:10.21685/2307-5538-2022-3-10

## РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОГО АДАПТИВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ АВТОТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ

В. Н. Ашанин<sup>1</sup>, С. Е. Ларкин<sup>2</sup>, С. Г. Исаев<sup>3</sup>, В. С. Чапаев<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup>ashanin58@yandex.ru, <sup>2</sup>LarkinSergei@yandex.ru, <sup>3</sup>sergeisaev@mail.ru, <sup>4</sup>chapaev010@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Движение в ночное время требует от водителей повышенной концентрации внимания, что приводит к преждевременной усталости. Особое внимание при этом необходимо уделить снижению ослепленности водителей транспортных средств при встречном разъезде автомобилей. В этой связи актуальной задачей является дальнейшее совершенствование системы головного освещения автомобиля и конструкции фар. Целью работы является повышение безопасности дорожного движения в темное время суток. *Материалы и методы.* Проблема ослепления заключается в том, что освещенность дорожного полотна между встречными автомобилями увеличивается обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Поэтому для повышения безопасности дорожного движения необходимо контролировать максимальный уровень освещенности между сближающимися автомобилями и изменять силу света их левых фар с тем, чтобы освещенность дорожного полотна между сближающимися автомобилями не превышала предельных значений. *Результаты.* Разработана система головного освещения автомобиля, позволяющая реализовать адаптивное освещение дорожного полотна на всех режимах движения автомобиля, обеспечивающая безопасный разъезд встречных транспортных средств. Использование RGB светодиода в качестве источника света позволяет создавать различные виды светораспределения без использования дополнительных фар. Предложенный способ перемещения линзы позволяет повысить точность создания требуемого светораспределения. *Результаты.* Настройка программного обеспечения для стационарных режимов работы при движении с постоянной скоростью может быть осуществлена на специально оборудованной для этого площадке завода-изготовителя. Работа в переходных режимах определяется временем реакции системы как на увеличение освещенности при сближении автомобилей, так и временем восстановления силы света левой фары после разъезда вследствие резкого изменения освещенности дорожного полотна. Указанные действия потребуют дополнительных натурных испытаний в заводских лабораториях. *Выводы.* Предложенная адаптивная фара головного освещения автомобиля позволяет создавать требуемое светораспределение в режимах дальнего, ближнего и противотуманного света, повышая тем самым безопасность дорожного движения.

**Ключевые слова:** фара головного освещения, автомобиль, освещенность дорожного полотна, адаптивное освещение, встречный разъезд, ослепление водителей, снижение освещенности

**Для цитирования:** Ашанин В. Н., Ларкин С. Е., Исаев С. Г., Чапаев В. С. Реализация концепции безопасного адаптивного освещения дороги автотранспортным средством // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 83–91. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-10

## IMPLEMENTING THE CONCEPT OF ADAPTIVE LIGHTING OF THE ROAD BY A MOTOR VEHICLE

V.N. Ashanin<sup>1</sup>, S.E. Larkin<sup>2</sup>, S.G. Isaev<sup>3</sup>, V.S. Chapaev<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>ashanin58@yandex.ru, <sup>2</sup>LarkinSergei@yandex.ru, <sup>3</sup>sergeisaev@mail.ru, <sup>4</sup>chapaev010@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Driving at night requires drivers to concentrate more, which leads to premature fatigue. Particular attention should be paid to reducing the glare of drivers of vehicles when oncoming cars. In this regard, an urgent task is to further improve the system of car headlights and headlight design. The purpose of the work is to improve road safety in the dark. *Materials and methods.* The problem of blindness is that the illumination of the roadway between oncoming cars increases inversely proportional to the square of the distance between them. Therefore, to increase traffic safety it is necessary to control the maximum level of illumination between approaching cars and to change the light intensity of their left headlights so that the illumination of the road surface between approaching cars should not exceed the limiting values. *Results.* The system of the head illumination of the car was designed to implement adaptive illumination of the roadway in all traffic modes of the car, which ensures safe passing of oncoming vehicles. RGB LED as a light source allows you to create different types of light distribution without using additional lights. The offered way of lens moving allows increasing the accuracy of creation of a required light distribution. *Results.* Adjustment of the software for stationary modes of operation when driving at a constant speed can be made on a specially equipped for this purpose site of the manufacturer's plant. Operation in transient modes is defined by time of reaction of the system as for illumination increase at approach of cars, and time of restoration of light intensity of the left headlight after driving apart as a result of sharp change of illumination of a road bed. These actions will require additional field testing in the factory laboratories. *Conclusions.* The proposed adaptive head lamp allows you to create the required light distribution in the modes of far, dipped and fog lights, thereby increasing the safety of road traffic.

**Keywords:** headlight, car, illumination of the roadway, adaptive lighting, oncoming traffic, blinding drivers, reduced illumination

**For citation:** Ashanin V.N., Larkin S.E., Isaev S.G., Chapaev V.S. Implementing the concept of adaptive lighting of the road by a motor vehicle. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):83–91. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-10

### Введение

При движении в темное время суток безопасность дорожного движения в существенной степени определяется светораспределением фар головного освещения. Традиционная фара освещает только тот участок дороги, который находится строго по курсу движения. При этом ни сила света, ни направление светового пучка не изменяются. Специфика движения в ночное время в условиях бурного наполнения дорог современными автомобилями, движущимися в интенсивном потоке движения, требует от водителей повышенной концентрации внимания из-за быстро изменяющейся дорожной обстановки. Это приводит к повышению усталости водителя. Для повышения безопасности дорожного движения фары головного освещения должны обеспечить дополнительные функции для формирования требуемого светораспределения и снижения ослепленности водителей.

Ряд из этих функций на настоящий момент реализуется в автомобилях известных производителей в высокобюджетном сегменте. К числу таких нововведений можно отнести ступенчатое изменение ширины светового пучка при изменении скорости движения, изменение направления светораспределения на поворотах. Однако этого уже недостаточно. Необходимо дальнейшее совершенствование систем светораспределения и конструкции фар. Концептуальными, на наш взгляд, направлениями развития системы головного освещения автомобиля являются:

- изменение освещенности дорожного полотна при встречном разъезде для снижения ослепленности водителей;
- плавное изменение ширины и дальности распространения светового пучка при изменении скорости движения автомобиля;
- плавное изменение направления светового пучка при изменении направления движения транспортного средства;

- создание адаптивного селективного противотуманного света;
- создание дневных ходовых огней с нормированной силой света;
- реализация фары головного освещения с возможностью обеспечения вышеперечисленных режимов светораспределения и огней в одной моноконструкции без дополнительных блоков, усложняющих процесс изготовления и снижающих коэффициент использования отражающей поверхности фары.

Локальные решения поставленной задачи по изменению светового пучка на дорожном полотне можно проследить в существующих подходах. Одним из них является поворот фары с помощью шаговых двигателей до тех пор, пока угол поворота фар не станет равен углу поворота рулевого колеса, или использование волоконно-оптического преобразователя изображения, в котором процесс регулирования положения светового пучка фары относительно дорожного полотна осуществляют поворотом волоконно-оптического преобразователя изображения относительно второй фокальной точки эллипсоидного отражателя в горизонтальной и/или вертикальной плоскостях [1, 2]. Вместе с тем данное решение не позволяет водителям разъехаться при встречном сближении без взаимного ослепления. Причина, на наш взгляд, заключается в возникающем дополнительном освещении дорожного полотна между сближающимися автомобилями. Кроме того, создание адаптивного противотуманного света в предложенной конструкции фары вообще не предусмотрено.

Другое направление связано со статическим изменением положения светотеневой границы правой и левой фары [3, 4] или в создании системы освещения между разъезжающимися автомобилями с закрытым световым пробелом, соответствующим встречному транспортному средству [5, 6]. Однако такое механическое изменение границ светового пятна приводит к созданию на дорожном полотне темного участка, освещенность которого сильно контрастирует с более освещенными. А это, как было описано выше, приводит к еще большему ослеплению водителей транспортных средств. Кроме того, такой подход не позволяет создавать противотуманный свет, тем более адаптивный.

Таким образом, приведенные технические решения не обеспечивают снижение ослепленности водителей при встречном разъезде. Не решаются и задачи по модернизации конструкции фар головного освещения. Следовательно, необходимо дальнейшее совершенствование системы головного освещения и конструкции фар.

### *Материалы и методы*

Важнейшей причиной снижения безопасности движения является ослепление водителей транспортных средств при встречном разъезде. Данная ситуация еще больше усугубляется при движении в зимнее время или дождь. Многие производители считают, что ослепление возникает вследствие неправильной регулировки светотеневой границы, которая существует в системах с европейской системой освещения. Однако это не так. В современных автомобилях настройке светотеневой границы уделяется большое внимание и ослепления водителей прямыми лучами фар не возникает. Кроме того, по современным нормам и правилам для предотвращения чрезмерной контрастности двух разноярких поверхностей, находящихся рядом, отношение освещенностей их поверхностей не должно превышать 20 раз. Это соотношение выдерживается при освещении дороги на ближнем свете при движении только одного автомобиля. Так, значение освещенности в зоне 1 контрольного экрана согласно нормам ЕЭК при ООН для ламп Н4 не должно превышать 30 лк, в то время как освещение правой обочины – 2 лк. Как видно, отношение освещенностей составляет 15. В этой связи водитель при переносе взгляда с обочины на середину дорожного полотна, где освещенность максимальная, не испытывает дискомфорта. Проблема ослепления заключается в том, что освещенность дорожного полотна между встречными автомобилями увеличивается обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Поэтому при сближении автомобилей в два раза освещенность дорожного полотна между ними увеличивается в четыре раза. Разнояркость поверхностей становится много больше установленного предельного значения, что и вызывает ослепление водителей встречных автомобилей при переносе ими взгляда с правой обочины в любую из зон, освещаемую двумя сближающимися автомобилями. И наоборот, при переносе взгляда в об-

ратном направлении, возникает эффект «черной ямы», когда водители в течение времени аккомодации человеческого глаза (около 5 с) практически ничего не видят. За это время при движении автомобилей со скоростями 60 км/ч каждый происходит сближение их на 167 м. И на этом участке дороги водители практически не контролируют дорожную обстановку, что может привести к аварии. Поэтому для повышения безопасности дорожного движения необходимо контролировать максимальный уровень освещенности между сближающимися автомобилями и изменять силу света их левых фар с тем, чтобы освещенность дорожного полотна между сближающимися автомобилями не превышала предельных значений.

На первом этапе модернизации системы освещения достаточно оборудовать уже имеющиеся автомобили автоматической системой изменения силы света левой фары. Сила света правой фары должна оставаться неизменной с тем, чтобы хорошо освещать обочину и движущихся по ней пешеходов. Для контроля освещенности дорожного полотна необходимо дополнительно использовать датчик, который можно установить на тыльной стороне зеркала заднего вида. Проведенный анализ показал, что датчик целесообразно настроить на контроль освещенности середины границы зоны 1 проверки освещенности ближнего света фар европейской системы светораспределения. Данная точка находится на разделительной полосе на расстоянии около 25 м от автомобиля и для нее установлены предельные значения максимальной освещенности. Характер изменения освещенности дорожного полотна для этого случая показан на рис. 1.

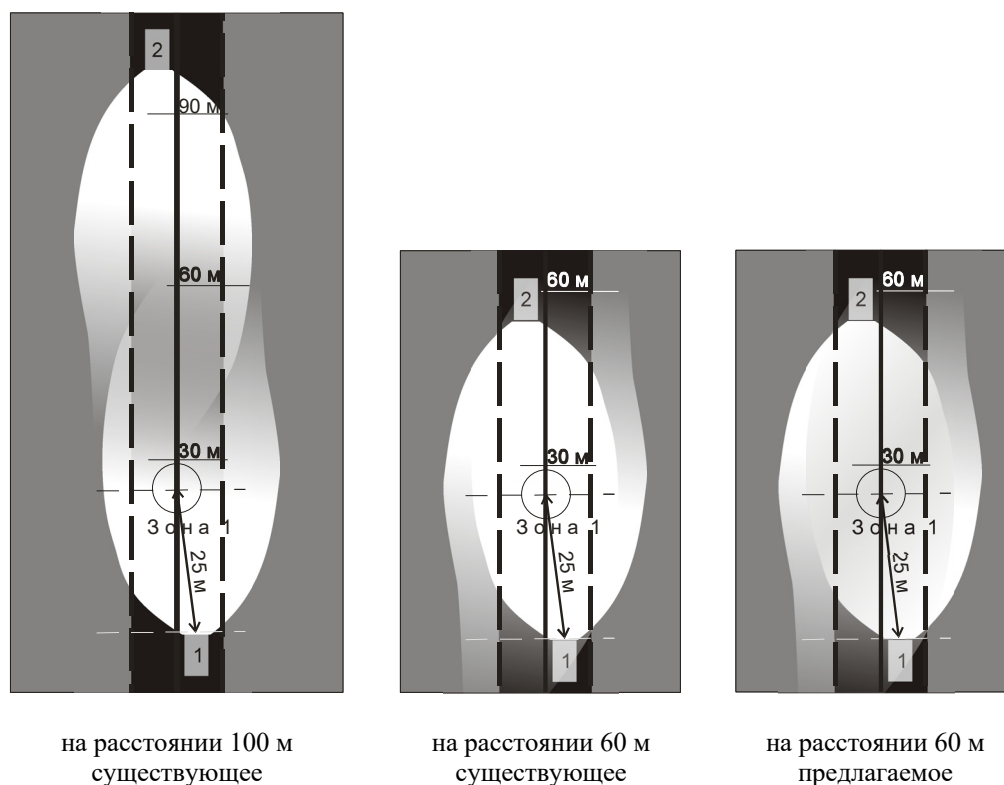


Рис. 1. Характер изменения освещения дорожного полотна при контроле освещенности между сближающимися автомобилями

### Результаты

Для реализации остальных требований концепции совершенствования системы головного освещения потребуется существенное изменение конструкции фары, поскольку адаптивное светораспределение предполагает плавное изменение направления и дальности распределения светового потока фары. Кроме того, реализация противотуманного света с изменяемой цветовой температурой источника потребует использования RGB светодиодов. Проведенный анализ известных технических решений позволил создать конструкцию фары [7, 8], которая удовлетворяет всем предъявляемым выше требованиям концепции развития адаптивного света. Конструкция фары приведена на рис. 2.

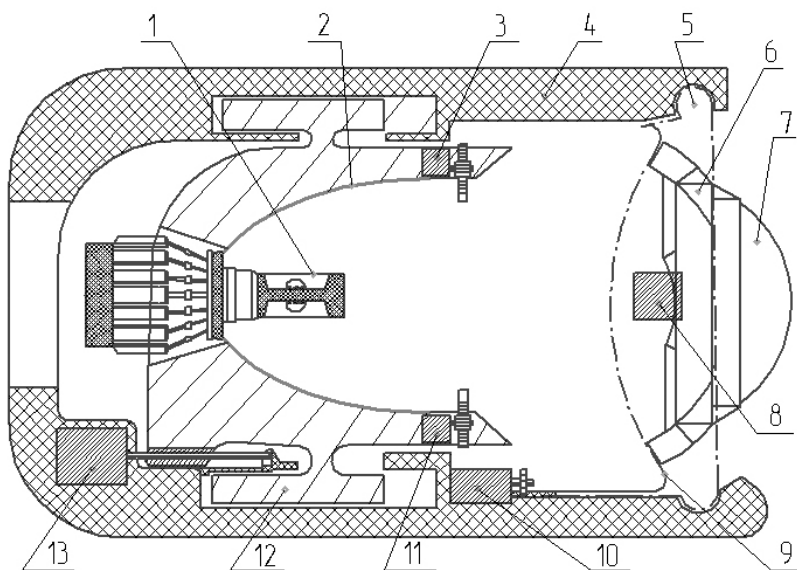


Рис. 2. Конструкция адаптивной фары:

1 – RGB светодиод; 2 – отражатель; 3 – двигатель обтюратора противотуманного света; 4 – корпус фары; 5 – направляющие горизонтального перемещения линзы; 6 – рамка вертикального перемещения линзы; 7 – линза; 8 – двигатель вертикального перемещения; 9 – рамка горизонтального перемещения линзы; 10 – двигатель горизонтального перемещения линзы; 11 – двигатель обтюратора ближнего света; 12 – направляющие продольного перемещения отражателя; 13 – двигатель продольного перемещения отражателя

К отличительным особенностям предложенной конструкции фары следует отнести: обеспечение перемещения линзы по сферической поверхности с помощью шаговых двигателей, введение обтюратора противотуманного света для получения узкого светового пучка, двигателей перемещения указанного обтюратора и обтюратора ближнего света. Система позволяет создавать требуемое освещение с изменением ширины светового пучка в зависимости от скорости движения, изменять высоту светового пучка как для создания требуемого освещения, так и в зависимости от загруженности автомобиля, а использование RGB светодиода позволило реализовать противотуманный свет. На рис. 3 приведены расположения линзы и отражателя при формировании различных светораспределений. Осевым перемещением отражателя осуществляется изменение ширины светового пучка вплоть до создания светораспределения прожекторного типа для специальных автомобилей. Поворот светового пучка происходит перемещением линзы в горизонтальной плоскости в зависимости от скорости движения и положения рулевого колеса. Перемещение в вертикальном направлении необходимо при формировании противотуманного света, а также при осевой нагрузке на заднюю ось.

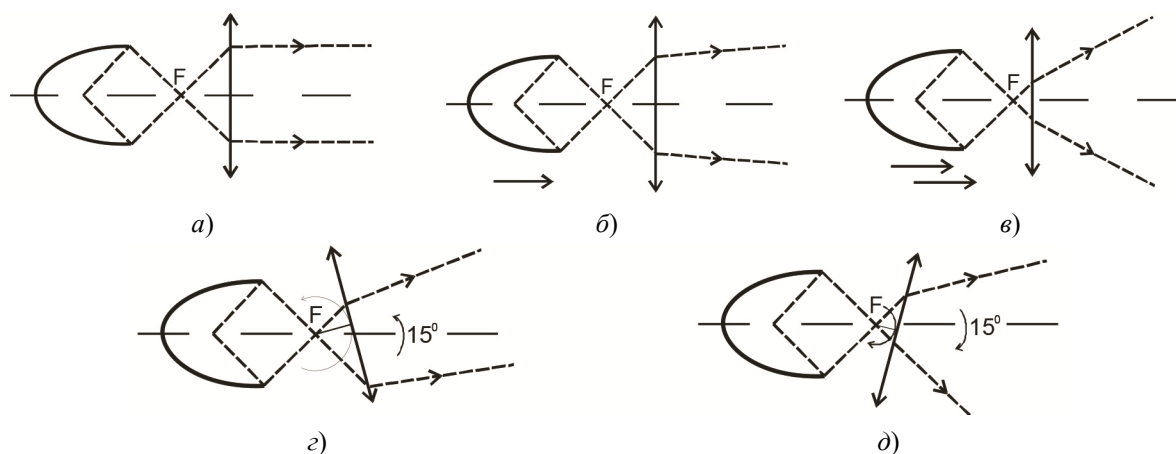


Рис. 3. Формирование адаптивной фарой различных светораспределений:

а – прожектор; б – дальний свет; в – ближний свет;  
г – поворот светового пятна на дальнем свете; д – поворот светового пятна на ближнем свете

Для улучшения светораспределения дорожного полотна на дальнем, ближнем и противотуманном свете в зависимости от положения рулевого колеса на всех скоростях движения автомобиля предлагается внести изменения в конструкцию фары [7], сделав ее более технологичной [9]. Конструкция перспективной адаптивной фары головного освещения автомобиля приведена на рис. 4.

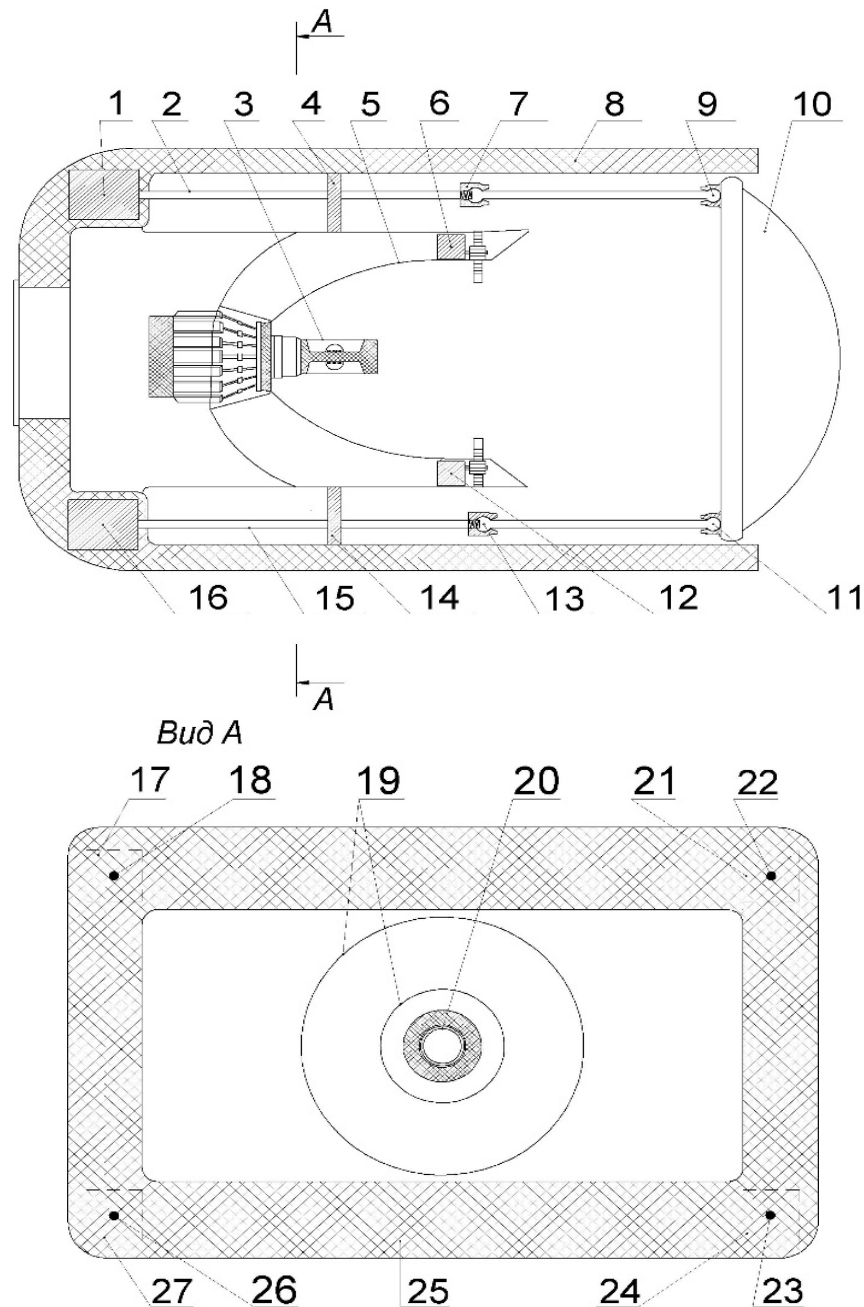


Рис. 4. Конструкция перспективной адаптивной фары головного освещения и ее вид А-А:  
 1, 16 – двигатели продольного перемещения линзы; 2, 15 – направляющие перемещения линзы;  
 3 – RGB светодиод; 4, 14 – фиксаторы продольного перемещения направляющих; 5 – отражатель;  
 6 – двигатель обтюлятора противотуманного света; 7, 13 – шаровые подпружиненные соединения;  
 8 – корпус фары; 9, 11 – шаровые крепления линзы; 10 – линза; 12 – двигатель обтюлятора  
 ближнего света; 17, 21, 24, 27 – двигатели продольного перемещения линзы; 18, 22, 23, 26 –  
 направляющие перемещения линзы; 19 – отражатель; 20 – RGB светодиод; 25 – корпус фары

Двигатели продольного перемещения линзы размещены по углам прямоугольной фары и соединены с линзой направляющими с шаровыми креплениями. Направляющая 26 выполнена цельной и является осью опоры при перемещении линзы в вертикальной и горизонтальной



плоскостях. Подпружиненные шаровые соединения 7, 13 в остальных опорах необходимы для обеспечения перемещения линзы в вертикальной и горизонтальной плоскостях из-за уменьшения ее проекции на соответствующие оси при поворотах рулевого колеса. Введение дополнительного двигателя для реализации продольного перемещения позволило заменить перемещение линзы по сферической поверхности продольным перемещением ее углов и существенно улучшило технологичность конструкции фары.

Рассмотрим принцип создания светораспределения предложенной конструкцией фары по сравнению с фарой на рис. 2. Принцип формирования светораспределения показан на рис. 5. Прежде всего необходимо отметить, что наличие дополнительного двигателя повысило функциональные возможности. Так, радиус сферической поверхности движения линзы адаптивной фары на рис. 2 неизменен и определяется конструкцией. Для обеспечения возможности движения автомобиля на любой скорости радиус перемещения линзы должен быть большим и равным  $R_1$ , как показано на рис. 5,а. Такое значение радиуса позволяет создавать адаптивное светораспределение при движении по автомагистралям при небольших радиусах поворота дорожного полотна.

При движении на небольших скоростях, в частности в черте населенного пункта, при подъезде к перекрестку в прототипе отражатель придвинется к линзе для увеличения ширины освещаемой зоны, и фокус сместится из  $F_1$  в  $F_2$ , как это показано на рис. 5,а. Тогда для поддержания требуемой ширины светового пучка при повороте на угол  $\alpha$  линза должна поворачиваться вдоль сферической поверхности радиусом  $R_2$ . Однако поскольку этот радиус изменить невозможно, то линза будет перемещаться по сферической поверхности с прежним радиусом  $R_1$ . Вследствие этого при повороте линзы на угол  $\alpha$  линза окажется не в положении 2, а в положении 2', что приведет к изменению светораспределения на дорожном полотне, и оно не будет соответствовать требуемому.

В предложенной перспективной конструкции фары адаптивного освещения эта проблема решена за счет отсутствия самой сферической поверхности и радиус кривизны сферической поверхности, равно как и расстояние до отражателя, устанавливается путем наклона линзы в вертикальной или горизонтальной плоскостях с одновременным ее перемещением на требуемое расстояние от фокуса (рис. 5,б) при изменении скорости движения автомобиля.

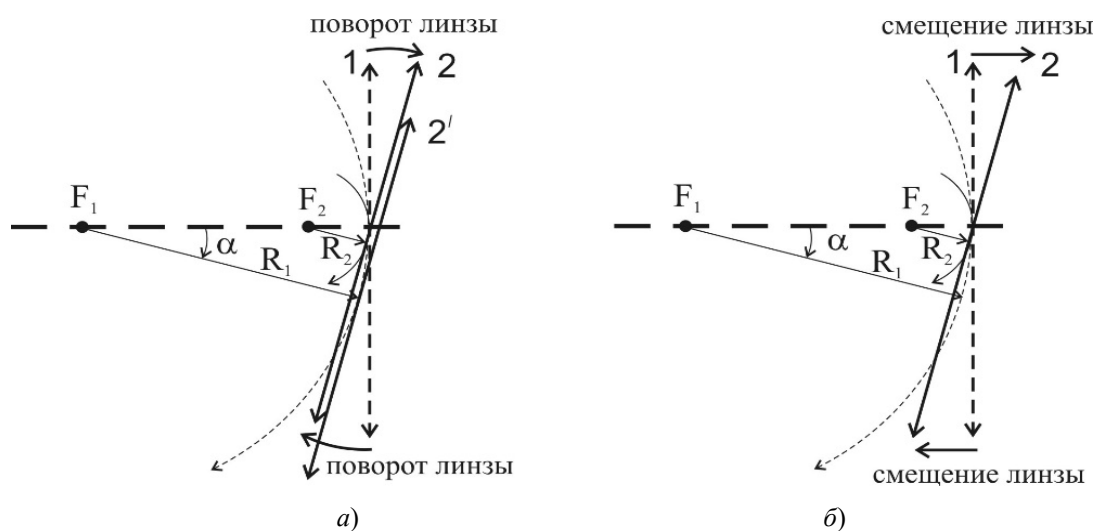


Рис. 5. Принцип формирования светораспределения перспективной адаптивной фары

### Обсуждение

Следует отметить, что первый этап модернизации системы светораспределения не требует существенного изменения конструкции и может быть реализован в короткие сроки. Необходимая настройка программного обеспечения для стационарных режимов работы при движении с постоянной скоростью может быть осуществлена на специально оборудованной для этого площадке завода изготовителя. Работа в переходных режимах определяется временем реакции системы как на увеличение освещенности при сближении автомобилей, так и

временем восстановления силы света левой фары после разъезда вследствие резкого изменения освещенности дорожного полотна. Указанные действия потребуют дополнительных натуральных испытаний в реальных условиях эксплуатации.

Наличие данной противоослепляющей системы только у одного из встречных автомобилей существенно снизит ослепление обоих водителей встречных автомобилей, поскольку система будет контролировать суммарную освещенность дорожного полотна, создаваемую двумя автомобилями, и снижать ее до допустимого уровня вплоть до полного выключения левой фары оборудованного указанной системой автомобиля.

Следующий этап внедрения предложенной системы освещения потребует некоторые временные затраты на разработку нового алгоритма работы системы освещения, предусматривающего, кроме того, еще и автоматическое включение адаптивного противотуманного света с подбором селективно-желтого света для увеличения дальности видимости дорожного полотна, а также настройку адаптивного изменения ширины, высоты, направления светового пучка, что принципиально необходимо для совершенствования системы освещения, улучшения видимости и снижения аварийности при движении в темное время суток.

### Заключение

Таким образом, разработанная адаптивная фара головного освещения автомобиля позволяет увеличить точность создания требуемого светораспределения на дальнем, ближнем и противотуманном свете при изменении положения рулевого колеса на всех скоростях движения транспортного средства, снижает деформацию светового пучка и освещенность его контрольных точек, увеличивая тем самым безопасность дорожного движения.

### Список литературы

1. Патент 87667 РФ. МПК В60Q 1/12. Устройство управлением фар транспортного средства / Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Надин С. И. ; № 2009122878/22 ; заявл. 15.06.2009 ; опубл. 20.10.2009. 5 с.
2. Патент 2289754 РФ. МПК F21S 8/12, F21V 14/00, В60Q 1/04. Способ регулирования светового пучка транспортного средства и устройство для его осуществления / Новаковский Л. Г., Королева Ю. Е., Новикова Л. А., Конюхов В. В., Марков Н. И. ; № 2005120212/28 ; заявл. 29.06.2005 ; опубл. 20.12.2006. 20 с.
3. Патент 2608203 РФ. МПК В60Q 1/04, В60Q 1/06, В60Q 1/068. Неослепляющая автомобильная фара / Сенько В. Д. ; № 2015122379 ; заявл. 09.06.2015 ; опубл. 17.01.2017. 8 с.
4. Патент 2149308 РФ. МПК F 21 S 8/12, В 60 Q 1/04, 1/16, 1/24, В 62 J 6/00. Способ освещения для транспортного средства, не ослепляющий водителей встречного транспорта / Богокин Л. А. ; № 96106471/09 ; заявл. 03.04.1996 ; опубл. 20.05.2000. 13 с.
5. Патент 2441778 РФ. МПК кл. В60Q 1/14, F21V 14/08. Система фар прожекторного типа для автомобилей / Магиас Э., Шмидт К. ; № 2010116290/11 ; заявл. 24.09.2007 ; опубл. 10.02.2012. 16 с.
6. Патент 2446963 РФ. МПК В60Q 1/04, F21S 8/12. Фара (варианты) и способы освещения дороги / Титков С. И., Тарасов Д. Г. ; № 2010147850/11 ; заявл. 24.11.2010 ; опубл. 10.04.2012. 14 с.
7. Патент 2656976 РФ. МПК В60Q 1/14, В60Q 1/04. Адаптивная система головного освещения автомобиля / Ашанин В. Н., Ларкин С. Е. ; № 2016152503 ; заявл. 29.12.2016 ; опубл. 07.06.2018. 11 с.
8. Ашанин В. Н., Ларкин С. Е. Инновационная система головного освещения автомобиля // Автомобильная промышленность. 2020. № 1. С. 22–26.
9. Патент 2758227 РФ. МПК В60Q 1/04, F21V 14/00, F21S 41/20, F21S 41/60. Адаптивная фара головного освещения / Ашанин В. Н., Ларкин С. Е. ; № 2020139489 ; заявл. 02.12.2020 ; опубл. 26.10.2021. 9 с.

### References

1. Patent 87667 Russian Federation MPK B60Q 1/12. *Ustroystvo upravleniem far transportnogo sredstva = Vehicle headlight control device*. Yatsun S.F., Mishchenko V.Ya., Nadin S.I.; № 2009122878/22; appl. 15.06.2009; publ. 20.10.2009. 5 s. (In Russ.)
2. Patent 2289754 Russian Federation MPK F21S 8/12, F21V 14/00, B60Q 1/04. *Sposob regulirovaniya svetovogo puchka transportnogo sredstva i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya = A method for regulating the light beam of a vehicle and a device for its implementation*. Novakovskiy L.G., Koroleva Yu.E., Novikova L.A., Konyukhov V.V., Markov N.I.; № 2005120212/28; appl. 29.06.2005; publ. 20.12.2006. 20 s. (In Russ.)
3. Patent 2608203 Russian Federation MPK B60Q 1/04, B60Q 1/06, B60Q 1/068. *Neosleplyayushchaya avtomobil'naya fara = Non-blinding car headlight*. Sen'ko V.D.; № 2015122379; appl. 09.06.2015; publ. 17.01.2017. 8 s. (In Russ.)

4. Patent 2149308 Russian Federation MPK F 21 S 8/12, V 60 Q 1/04, 1/16, 1/24, V 62 J 6/00. *Sposob osveshcheniya dlya transportnogo sredstva, ne osleplyayushchiy voditeley vstrechnogo transporta = A method of lighting for a vehicle that does not blind drivers of oncoming vehicles.* Bogokin L.A.; № 96106471/09; appl. 03.04.1996; publ. 20.05.2000. 13 s. (In Russ.)
5. Patent 2441778 Russian Federation MPK kl. B60Q 1/14, F21V 14/08. *Sistema far prozhektornogo tipa dlya avtomobily = Searchlight type headlight system for cars.* Matias E., Shmidt K.; № 2010116290/11; appl. 24.09.2007; publ. 10.02.2012. 16 s. (In Russ.)
6. Patent 2446963 Russian Federation MPK B60Q 1/04, F21S 8/12. *Fara (varianty) i sposoby osveshcheniya dorogi = Headlight (options) and methods of road lighting.* Titkov S.I., Tarasov D.G.; № 2010147850/11; appl. 24.11.2010; publ. 10.04.2012. 14 s. (In Russ.)
7. Patent 2656976 Russian Federation MPK B60Q 1/14, B60Q 1/04. *Adaptivnaya sistema golovnogo osveshcheniya avtomobilya = Adaptive car-mobile head lighting system.* Ashanin V.N., Larkin S.E.; № 2016152503; appl. 29.12.2016; publ. 07.06.2018. 11 s. (In Russ.)
8. Ashanin V.N., Larkin S.E. Innovative car head lighting system. *Avtomobil'naya promyshlennost' = Automotive industry.* 2020;(1):22–26. (In Russ.)
9. Patent 2758227 Russian Federation MPK B60Q 1/04, F21V 14/00, F21S 41/20, F21S 41/60. *Adaptivnaya fara golovnogo osveshcheniya = Adaptive head lamp.* Ashanin V.N., Larkin S.E.; № 2020139489; appl. 02.12.2020; publ. 26.10.2021. 9 s. (In Russ.)

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

#### **Василий Николаевич Ашанин**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедры электроэнергетики  
и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ashanin58@yandex.ru

#### **Vasily N. Ashanin**

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

#### **Сергей Евгеньевич Ларкин**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроэнергетики  
и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: LarkinSergei@yandex.ru

#### **Sergey E. Larkin**

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

#### **Сергей Геннадиевич Исаев**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроэнергетики  
и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: sergeisaev@mail.ru

#### **Sergey G. Isaev**

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

#### **Вячеслав Сергеевич Чапаев**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроэнергетики  
и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: chapaev010@mail.ru

#### **Vyacheslav S. Chapaev**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of electric power and electrical engineering,  
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 12.05.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 13.06.2022**

**Принята к публикации/Accepted 11.07.2022**

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

УДК 621.31

doi:10.21685/2307-5538-2022-3-11

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШКАЛ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Т. В. Бувевич<sup>1</sup>, А. Г. Кириллов<sup>2</sup>, В. Н. Сакевич<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь  
<sup>1</sup>buevih.tv@gmail.com, <sup>2</sup>kirillov.malp@gmail.com, <sup>3</sup>igsakevich@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Приборная шкала состоит из металлического или полимерного основания, на которое нанесены краски для обозначения градуировок, знаков и символов. Нанесение цветных изображений осуществляется способами шелкотрафаретной, фотохимической или тампонной печати, которые имеют ряд существенных недостатков. Шкалы на металлической основе требуют специальной предварительной подготовки поверхности. При изготовлении пленочных шкал после нанесения краски плоская основа подвергается резке по контуру с выполнением технологических отверстий. Этот процесс осуществлялся вырубкой на прессе, причем для изготовления каждого вида шкалы требуется большая номенклатура высокоточной оснастки. Цель работы – разработка автоматизированной технологии изготовления приборных шкал, включающей современные цифровые технологии нанесения слоистых систем краски, механической резки по контуру, автоматизированного нанесения клея, обеспечивающих высокое качество изделий. *Материалы и методы.* Изображение наносилось за одну технологическую операцию на струйном принтере с УФ-отверждением. Испытания показали, что опытные образцы циферблатов из пленки Makrofol DE 6-2 Natur 0.42 соответствуют эксплуатационным требованиям и требованиям по межоперационному хранению. Поставленные задачи решены на основании результатов опытных работ по исследованию внедряемых технологических процессов; использования методов компьютерного моделирования. *Результаты.* Разработан способ изготовления приборной шкалы и автоматизированная линия для его осуществления, включающая участок современных цифровых технологий нанесения слоистых систем на струйном принтере с УФ-отверждением, участок механической резки по контуру на режущем плоттере, участок автоматизированного локального нанесения клея, реализованная в виде автоматизированного комплекса. *Выводы.* Предлагаемая технология изготовления пленочных шкал для информационно-измерительных приборов обеспечивает повышение производительности в 6,8 раз, повышение экономичности и гибкости производства, позволяет быстро и малозатратно перестраиваться на выпуск новых изделий программным путем за счет комплексного внедрения новых методов автоматизации и современных технологических процессов на всех этапах производственного цикла.

**Ключевые слова:** автоматизированная технология, пленочная шкала, прибор, цифровая печать, раскрой, изготовление, струйный принтер, режущий плоттер, автоматизированный комплекс

**Для цитирования:** Бувевич Т. В., Кириллов А. Г., Сакевич В. Н. Автоматизированная технология изготовления шкал для информационно-измерительных приборов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 92–100. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-11

## AUTOMATED TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING SCALES FOR INFORMATION AND MEASURING DEVICES

T.V. Buevich<sup>1</sup>, A.G. Kirillov<sup>2</sup>, V.N. Sakevich<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Republic of Belarus  
<sup>1</sup>buevih.tv@gmail.com, <sup>2</sup>kirillov.malp@gmail.com, <sup>3</sup>igsakevich@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* The instrument scale consists of a metal or polymer base, on which paints are applied to indicate graduations, signs and symbols. The application of color images is carried out by silk-screen, photochemical or pad printing methods, which have a number of significant disadvantages. Metal-based scales require special preliminary surface preparation. In the manufacture of film scales, after applying paint, the flat base is cut along the contour with the execution of technological holes. This process was carried out by cutting on a press, and a large range of high-precision tooling is required for the manufacture of each type of scale. The purpose of the work is to develop an automated technology for manufacturing instrument scales, including modern digital technologies for applying layered paint systems, mechanical contour cutting, automated glue application, ensuring high quality products. *Materials and methods.* The image was applied in one technological operation on an inkjet printer with UV curing. Tests have shown that prototypes of dials made of Makrofol DE 6-2 Natur 0.42 film meet operational requirements and requirements for interoperative storage. The tasks were solved on the basis of the results of experimental work on the study of implemented technological processes; the use of computer modeling methods. *Results.* A method of manufacturing an instrument scale and an automated line for its implementation has been developed, including a section of modern digital technologies for applying layered systems on an inkjet printer with UV curing, a section of mechanical contour cutting on a cutting plotter, a section of automated local glue application, implemented as an automated complex. *Conclusions.* The proposed technology for manufacturing film scales for information and measuring devices provides a 6.8-fold increase in productivity, increased efficiency and flexibility of production, allows you to quickly and cost-effectively rebuild to produce new products programmatically through the integrated introduction of new automation methods and modern technological processes at all stages of the production cycle.

**Keywords:** automated technology, film scale, device, digital printing, cutting, manufacturing, inkjet printer, cutting plotter, automated complex

**For citation:** Buevich T.V., Kirillov A.G., Sakevich V.N. Automated technology for manufacturing scales for information and measuring devices. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):92–100. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-11

### *Введение*

В настоящей работе представлены результаты разработки автоматизированной технологии изготовления приборных шкал, реализованной в виде автоматизированного комплекса из участков цифровой печати, механической резки по контуру, нанесения клея на шкалу.

Для информационно-измерительных приборов изготавливается широкая номенклатура шкал. Приборная шкала представляет собой непрозрачное металлическое (сплавы алюминия, сталь) или прозрачное полимерное (оргстекло, силикатное стекло, пленки поликарбонатные) основание, на которое нанесены краски для обозначения градуировок, знаков и символов, а также для покрытия зон за пределами контуров градуировок, знаков и символов. Основным ограничением при выборе материала полимера для прозрачных шкал являются температурные требования к шкале от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Таким требованиям удовлетворяют только поликарбонатные пленки.

На рынке представлено огромное количество названий и марок поликарбонатной пленки с различными свойствами. При выборе материала, соответствующего предъявляемым к шкалам техническим и экономическим требованиям, были проведены следующие испытания различных пленок Makrofol компании Bayer: проверка теплопрочности по ТУ РБ 300125187.177-2002; проверка холодопрочности по ТУ РБ 300125187.180-2002; проверка влагуостойчивости по ТУ РБ 300125187.177-2002; проверка вибропрочности ТУ РБ 300125187.177-2002; проверка устойчивости к воздействию топливно-смазочных материалов; проверка устойчивости к воздействию антистатика; проверка освещенности шкалы по ТУ РБ 300125187.177-2002.

### *Материалы и методы*

По результатам проведенных испытаний в качестве материала для шкал выбрана пленка Makrofol DE 6-2 Natur 0.42. Пленка Makrofol DE 6-2 – прозрачная, светорассеивающая, устойчивая к царапинам, экструдированная, разработана специально для графических применений. Структура поверхностей пленки – высокобархатная, высококоматовая. Диапазон толщин пленки – 125...500 микрон.

Предварительные испытания опытных образцов шкал из выбранного материала показали их соответствие эксплуатационным требованиям и требованиям по межоперационному хранению.

Ответственным технологическим этапом изготовления шкалы является нанесение изображений на основу. Традиционно нанесение краски осуществляется способами шелкотрафаретной [1], фотохимической или тампонной печати, которые имеют ряд недостатков. Грубость ячеистой сетки не позволяет достигнуть желаемой детализации изображения. Необходимость естественной сушки либо сушки в условиях вынужденной конвекции удлинит процесс и увеличивает энергозатраты. При выполнении цветного изображения требуются краски конкретных оттенков, что ведет к большим расходам на замену красок при переходе на изготовление новой шкалы, к необходимости иметь в наличии и хранить краски всей цветовой гаммы. Таким образом, недостатками традиционных способов нанесения изображения являются низкое разрешение рисунка (50–90 dpi), сложная передача градиентов цвета, высокая материалоемкость, энергоемкость и, соответственно, стоимость процесса [2, 3].

По новой технологии на пленочную основу для создания на приборных шкалах цветных изображений в местах градуировок, знаков и символов, которые должны восприниматься в определенном цвете, а также покрытия участков вне контуров градуировок, знаков и символов краски наносятся цифровой печатью на струйном принтере с УФ-отверждением за одну технологическую операцию.

Требуемые цветовые оттенки изображения образуются путем наложения соответствующих слоев красок. Для УФ принтера применяется цветовая схема CMYK, состоящая из четырех стандартных цветов: голубого, пурпурного, желтого и черного. Требуемые цвета градуировок, знаков, символов, а также зон за их контурами образуются одним или несколькими частично или полностью перекрывающимися друг друга прозрачными слоями красок стандартной цветовой схемы, что позволяет получать любые требуемые оттенки без замены красок при переходе на изготовление новой шкалы. Дополнительно имеются картриджи с белым цветом и лаком. Наличие белого цвета оказывает важное влияние на формирование оптической плотности и улучшает цветопередачу на прозрачных носителях [4]. При нанесении лака обеспечиваются твердость и долговечность покрытия, а также осуществляется заполнение регионов для задания требуемой толщины слоев [5, 6].

В результате проведенных исследований разработана методика нанесения слоистых систем на прозрачный циферблат. Исходная информация об изображении графических элементов шкалы содержится в виде чертежа. При подготовке печати слоистых систем графическую информацию чертежа разделяют на слои в векторном формате с использованием различных графических примитивов и заливок. Формат представления векторной графики содержит математическое описание элементарных графических объектов (примитивов): отрезков прямых, окружностей и их дуг, текстовых надписей и др. Примитивы для печати имеют заливку и располагаются на нескольких слоях, количество которых определяется количеством слоев краски или лака, наносимых на циферблат. На рис. 1 приведены примеры вида приборной панели и чертежа лицевой стороны ее шкалы.



Рис. 1. Вид приборной панели и чертеж лицевой стороны ее шкалы

Использование векторного формата обусловлено высокими требованиями к точности, качеству и производительности печати.

На первом этапе разработки слоистой системы формируется верхний (видимый) слой, который является лицевой стороной циферблата. Требования при печати верхнего слоя к символам и обозначениям – по ГОСТ 26336-97; к цветовой схеме – желтая, зеленая, красная, белая, черная. На втором этапе разрабатывается нижний (невидимый) слой, который необходим для повышения контрастности при подсветке циферблата с обратной стороны. Общий вид нижнего слоя, формируемого с помощью клея, показан на рис. 2, в.



Рис. 2. Общий вид: а – пленочной приборной шкалы с лицевой стороны без подсветки (верхний слой); б – с лицевой стороны с подсветкой (нижний слой); в – приборной шкалы с обратной стороны, на которую нанесен клеевой слой в виде отдельных пятен, которые слабо видны на рисунке по причине бесцветности и прозрачности клея

Для реализации технологии цифровой печати выбран планшетный УФ-принтер Mimaki UJF-6042 MkII [7]. Формат печати A2 (610 × 420 мм), скорость печати до 3,52 м<sup>2</sup>/ч, толщина материала до 153 мм, разрешение 1200 × 1200 точек на дюйм, интерфейс USB, Ethernet. Для печати пробных циферблатов использовались следующие краски фирмы Argon: желтая 16-201, зеленая 16-501, красная 16-303 (в.ч. 100), белая 16-100, черная 35-797.

Повышение точности при использовании векторного формата изображений циферблатов достигается за счет точного соблюдения размеров и расположения как печатаемых элементов, так и размеров всего изображения; заданием цветов в цветовой модели СМΥК; точным совмещением печатаемых слоев. Производительность при печати векторных изображений повышается по сравнению с печатью растровых изображений за счет уменьшения объема, занимаемого изображением. После формирования изображения в векторном формате печать осуществляется с помощью раstra, наносимого посредством отдельных капель, с разрешением 1200 dpi. Векторный формат позволяет формировать растровое изображение с различным размером пикселей. Новая технология эмуляционного дизеринга Mimaki Fine Diffusion 1 technology (MFD1) позволяет особым образом обрабатывать печатные данные, чтобы в режиме четырехцветной печати получить максимально высокое качество изображения без видимого раstra и с бесступенчатыми градиентными переходами.

Для пленочных шкал после нанесения цветных изображений плоская основа с рисунком подвергается резке по контуру с выполнением технологических отверстий. Этот процесс осуществлялся вырубкой на прессе, что нецелесообразно: для каждого вида шкалы требуются изготовление, обслуживание и ремонт большой номенклатуры высокоточной оснастки (до 37 штампов); на точность вырубki существенное влияние оказывает человеческий фактор; невозможно оперативно вносить изменения в расположение и формы градуировок, символов, знаков и других элементов. Проводились экспериментальные и теоретические исследования возможности резки на CO<sub>2</sub>-лазере, в результате чего выявлено негативное влияние процессов окисления и плавления в зоне резания, а также окисление слоев краски. Исследование процессов окисления и плавления при резании на CO<sub>2</sub>-лазере листов из поликарбоната и других по-

лимеров осуществлялось авторами [8–10]. Подбор режимов резания [11] не дал существенных улучшений качества операции.

По новой технологии предлагается механическая резка по заданной управляющей программе на режущем плоттере. Нож режущего плоттера в соответствии с заданной последовательностью выполняет вначале внутренние отверстия, а затем вырезает шкалу по контуру. Чтобы исключить смещение контура циферблата относительно градуировки, необходимо точное позиционирование пленки при ее загрузке в режущий плоттер. Данное позиционирование осуществляется посредством системы технического зрения режущего плоттера по технологическим меткам в виде крестиков размером около 10 мм, нанесенным на пленку вместе с основным изображением.

Для управляющей резкой программы по исходной информации чертежа шкалы в векторном редакторе формируются соответствующие линии контуров для резки технологических отверстий для позиционирования циферблата на стекле прибора и наружных контуров шкалы. Прimitives для раскроя не имеют заливки (отрезки прямых, дуги окружностей, сплайны) и располагаются на отдельном слое, который представлен на рис. 3.

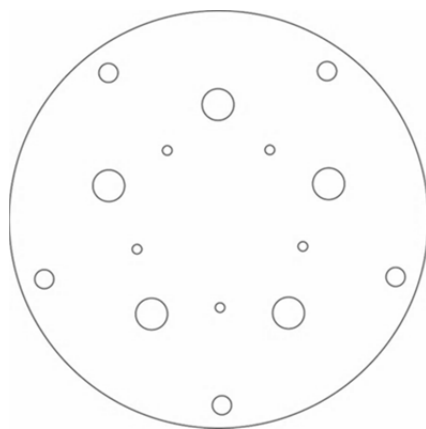


Рис. 3. Наружный контур шкалы и контуры отверстий

Для повышения производительности как резки пленочных шкал с помощью режущего плоттера, так и печати шкал на УФ-принтере разрабатывается групповая раскладка, которая представляет собой файл с размещенными в определенном порядке по горизонтали и вертикали изображениями отдельных шкал.

Групповой раскрой позволяет уменьшить количество отходов пленки и уменьшить затраты времени на операции загрузки-выгрузки. Раскладка для группового раскроя зависит от поля обработки плоттера, размеров шкал и технологических отступов от края заготовки до шкал, а также между шкалами.

Объединение информации о резке и печати шкал в одном файле позволяет уменьшить количество ошибок при их разработке, а также позволяет точно совместить контуры для печати и раскроя. Программное обеспечение комплекса для печати, механической резки обеспечивает формирование изображений раскладки, используя многослойные изображения шкал. Для печати изображения используется несколько слоев, а для резки – один дополнительный слой.

Для реализации автоматизированной технологии изготовления пленочных шкал выбран планшетный режущий плоттер Bigzee Cutter для листовых материалов. Рулонные материалы для печати шкал не подходят, так как для придания шкале плоского вида потребуется введение в технологию изготовления шкалы дополнительной операции по выпрямлению заготовки, что приведет к удорожанию изделия. После фиксации листа на рабочем столе процесс раскроя листового материала выполняется ножом режущей головки, движущейся по заданной траектории с помощью подвижной каретки. Исполняющая процесс резки режущая головка может двигаться в различных направлениях. Фиксация листов на столе производится с помощью специально оборудованного вакуумного устройства. Основные характеристики режущего плоттера Bigzee Cutter: толщина обрабатываемого материала – от 0,42 мм; максимальная об-



ласть резки – не менее  $610 \times 420$  мм; скорость резки не менее 20 мм/с; абсолютная точность резки – погрешность не более  $\pm 0,1$  мм [12].

Для качественной резки пленочных шкал обосновано преимущество статического (тангенциального) ножа. Особенностью тангенциального ножа является то, что на крутых поворотах траектории резки нож автоматически поднимается, выходя из материала, поворачивается на рассчитанный угол и опускается в материал вновь. Тем самым исключается вращение лезвия в материале, последствием которого может быть скол верхнего слоя сложной пленки, например, напечатанного слоя, сдвиг носителя или дефект резки. Поворотом лезвия ножа при тангенциальной резке управляет процессор, рассчитывающий положение лезвия в каждой точке траектории, что дает более аккуратный результат даже при резке мелких элементов, букв и знаков размером менее 5 мм на больших скоростях. Возможность раскроя толстых (до 1,2 мм) и сложных по своему составу пленок обеспечивается в полтора раза большим давлением на тангенциальный нож по сравнению с флюгерным ножом. Тангенциальное управление обеспечивает точное следование контуру резки, в то время как поворот флюгерного ножа запаздывает при смене направления вектора резки, для чего в управляющей программе вводят поправочные коэффициенты, зависящие от характеристик материала. Кроме этого, лезвие вращается сквозь втулку, подшипники которой прижимают материал в области резки, что исключает эффект подъема материала вслед за лезвием.

После вырезания технологических отверстий и самой приборной шкалы приборная шкала помещается в блок для автоматизированного нанесения клея, где ее ориентируют с помощью трафарета по маркерным меткам и наносят клей на тыльную сторону приборной шкалы в заданных местах с помощью тампонной печати. Клей не наносится в местах расположения источников света, осуществляющих подсветку шкалы. Требования к клею следующие: клей должен быть прозрачным, бесцветным и удерживать шкалу от смещений на циферблате в температурном диапазоне от  $-70$  °С до  $+125$  °С, шкала должна иметь возможность отсоединения от циферблата без разрушения и быть приклеена снова на циферблат без дополнительного нанесения клея.

Использование готовых листов с клейкой поверхностью не оправдало себя из-за высокой стоимости, ограничений по толщине, прочностным и оптическим свойствам существующих материалов. В связи с этим разработана установка для автоматизированного нанесения клея в определенных точках. Подбор оптимальных параметров рабочего процесса для автоматизированного нанесения клея с использованием сжатого воздуха осуществлялся в работах [13, 14].

Разработана технология и создана установка для точечного автоматизированного нанесения клея на обратную сторону циферблата в заданных местах. Количество точек и места их нанесения оптимизированы из соображений необходимой прочности соединения циферблата и шкалы и минимизации времени для их нанесения.

Блок для автоматизированного нанесения клея разработан на базе старой машины QUADRA, предназначенной для технологий поверхностного монтажа. Была взята от QUADRA вся механика и система управления перемещением головки. Головка модифицирована для нанесения клея с помощью тампонной печати. Установку снабдили узлом вакуумного прижима циферблатов, специальным трафаретом для ориентации по маркерным меткам циферблатов, системой автоматической подачи и перелива клея. Максимальная рабочая площадь машины –  $550 \times 420$  мм. Точность составляет  $\pm 0,10$  мм по осям  $X$  и  $Y$ . Повторяемость равна  $\pm 0,06$  мм на осях  $X$  и  $Y$ . Производительность – более 4000 пятен в час.

Проведены исследования по выбору марки и концентрации клея, а также инструмента для его нанесения на пленочную шкалу. Для крепления циферблатов к шкале подобран клей Kiworprint D159AF, разведенный с водой в соотношении 1:1.

По испытаниям насадок из разных материалов предпочтительнее оказались насадки из пористой резины ТУ 38 105867-90 формы «мягкий конус». Насадка совместима с клеем Kiworprint D159AF, дает четкий отпечаток и равномерный слой клея, позволяет регулировать толщину и диаметр отпечатка клея изменением глубины погружения в ванну с клеем и высоты подъема над рабочим столом.

### *Результаты*

Таким образом, разработана новая технология изготовления приборных шкал с автоматизацией процесса их производства и реализована в виде универсального программно-

аппаратного комплекса, состоящего из участка автоматизированной цифровой печати на струйном принтере с УФ-отверждением, участка автоматизированной резки по контуру с выполнением технологических отверстий на планшетном режущем плоттере, участка автоматизированного нанесения клея в заданных местах на специально доработанной установке на базе машины QUADRA.

Анализ источников патентной и научно-технической информации по способам изготовления циферблатов, нанесения изображения и крепления циферблата показал, что аналоги готовых автоматизированных систем изготовления приборной шкалы и автоматизированной линии для его осуществления в мире отсутствуют. Идеи, положенные в создаваемую инновацию, защищены патентом [15].

### *Заключение*

Разработанный технологический процесс обеспечивает следующие возможности:

- быстрая переналадка программным путем без переоснащения оборудования, что дает возможность изготовления шкал в день заказа;
- нанесение многослойного цветного покрытия за один цикл;
- формирование изображения на плоской основе и на объемном предмете;
- изготовление шкал на пленочной основе без дополнительной оснастки;
- снижение материалоемкости, трудоемкости, энергоемкости изготовления продукции;
- унификация способов нанесения изображения на шкалы;
- возможность выпуска продукции нестандартных исполнений и малых серий;
- повышение качества выпускаемых изделий.

Благодаря интегрированному подходу к разработке цифровых технологий печати, раскроя пленочных шкал и нанесения клея на их тыльную сторону достигнуто повышение гибкости производственного процесса изготовления пленочных шкал с одновременным обеспечением высокой производительности процесса и качества продукции.

### *Список литературы*

1. Cazac V., Cîrja J., Balan E., Mohora C. The study of the screen printing quality depending on the surface to be printed // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 178. P. 03015.
2. Потапов Ю., Потапова У. Мир трафаретной печати : практ. пособие. М. : Гелла-Принт, 2001. 112 с.
3. Все о шелкографии: виды, способы нанесения, особенности. URL: <https://www.grizzlyb2b.ru/blog/vsye-o-shelkografi-vidy-sposoby-naneniya-osobennosti/> (дата обращения: 08.02.2022).
4. Wu Y. J. Color Reproduction Study on the Corrugated Packaging Using UV Wide-format Inkjet Printer // NIP & Digital Fabrication Conference, Printing for Fabrication Online 2021 Final Program and Proceedings. 2021. P. 92–97.
5. Takatani T., Fujita K., Tanaka K. et al. Controlling translucency by UV printing on a translucent object // IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications. 2018. Vol. 10. P. 7.
6. Li K., Li T., Zhang T. et al. Facile full-color printing with a single transparent ink // Science advance. 2021. Vol 7. P. 39.
7. УФ-принтер Mimaki UJF-6042 MkII. URL: <https://www.ofitrade.ru/cat/plotters/uv/mimaki-ujf-6042-mkii/> (дата обращения: 08.02.2022).
8. Wu C., Li M., Huang Y., Rong Y. Cutting of polyethylene terephthalate (PET) film by 355 nm nanosecond laser // Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 133. P. 106565.
9. Moradi M., Karami Moghadam M., Shamsborhan M. et al. Simulation, statistical modeling, and optimization of CO2 laser cutting process of polycarbonate sheets // Optik. 2021. Vol. 225. P. 164932.
10. Hashemzadeh M., Mohammadi M. The Effect of Power and Maximum Cutting Speed on the Material Removal Rate and Cutting Volume Efficiency in CO2 Laser Cutting of Polycarbonate Sheets // Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production. 2020. Vol. 9. P. 5–23.
11. Mushtaq R. T., Wang Y., Rehman M. et al. State-Of-The-Art and Trends in CO2 Laser Cutting of Polymeric Materials—A Review // Materials. 2020. Vol. 13. P. 3839.
12. Планшетный режущий плоттер BIGZEE CUTTER. URL: <https://cutter.bigzee.ru/> (дата обращения: 08.02.2022).
13. Chen W., Huang Z. C., Zhou C. Y. The development of the automatic spray glue machine and its control system // Mechanical engineer. 2012. Vol. 8. P. 72–74.
14. Wang Y. A., Xie X. P., Lu X. H. Design of a Double-Nozzle Air Spray Gun and Numerical Research in the Interference Spray Flow Field // Coatings. 2020. Vol. 10. P. 475.
15. Патент Республики Беларусь № 23357. Способ изготовления приборной шкалы и автоматизированная линия для его осуществления / Колпаков В. И., Зиновенко В. С., Кириллов А. Г., Сакевич В. Н. ; зарег. 25.07.2019.

## References

1. Cazac V., Cîrja J., Balan E., Mohora C. The study of the screen printing quality depending on the surface to be printed. *MATEC Web Conf.* 2018;178:03015.
2. Potapov Yu., Potapova U. *Mir trafaretnoy pechati: prakt. posobie = The world of screen printing: a practical guide.* Moscow: Gella-Print, 2001:112. (In Russ.)
3. *Vse o shelkografii: vidy, sposoby naneseniya, osobennosti = All about silkscreen printing: types, methods of application, features.* (In Russ.) Available at: <https://www.grizzlyb2b.ru/blog/vsye-o-shelkografii-vidy-sposoby-naneseniya-osobennosti/> (accessed 08.02.2022).
4. Wu Y.J. Color Reproduction Study on the Corrugated Packaging Using UV Wide-format Inkjet Printer. *NIP & Digital Fabrication Conference, Printing for Fabrication Online 2021 Final Program and Proceedings.* 2021:92–97.
5. Takatani T., Fujita K., Tanaka K. et al. Controlling translucency by UV printing on a translucent object. *IPSI Transactions on Computer Vision and Applications.* 2018;10:7.
6. Li K., Li T., Zhang T. et al. Facile full-color printing with a single transparent ink. *Science advance.* 2021;7:39.
7. *UF-printer Mimaki UJF-6042 MkII.* Available at: <https://www.ofitrade.ru/cat/plotters/uv/mimaki-ujf-6042-mkii/> (accessed 08.02.2022).
8. Wu C., Li M., Huang Y., Rong Y. Cutting of polyethylene terephthalate (PET) film by 355 nm nanosecond laser. *Optics & Laser Technology.* 2021;133:106565.
9. Moradi M., Karami Moghadam M., Shamsborhan M. et al. Simulation, statistical modeling, and optimization of CO2 laser cutting process of polycarbonate sheets. *Optik.* 2021;225:164932.
10. Hashemzadeh M., Mahammadi M. The Effect of Power and Maximum Cutting Speed on the Material Removal Rate and Cutting Volume Efficiency in CO2 Laser Cutting of Polycarbonate Sheets. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production.* 2020;9:5–23.
11. Mushtaq R.T., Wang Y., Rehman M. et al. State-Of-The-Art and Trends in CO2 Laser Cutting of Polymeric Materials—A Review. *Materials.* 2020;13:3839.
12. *Planshetnyy rezhushchiy plotter BIGZEE CUTTER = Flatbed cutting plotter BIGZEE CUTTER.* (In Russ.). Available at: <https://cutter.bigzee.ru/> (accessed 08.02.2022).
13. Chen W., Huang Z.C., Zhou C.Y., The development of the automatic spray glue machine and its control system. *Mechanical engineer.* 2012;8:72–74.
14. Wang Y.A., Xie X.P., Lu X.H. Design of a Double-Nozzle Air Spray Gun and Numerical Research in the Interference Spray Flow Field. *Coatings.* 2020;10:475.
15. Patent Republic of Belarus № 23357. *Sposob izgotovleniya pribornoy shkaly i avtomatizirovannaya liniya dlya ego osushchestvleniya = A method of manufacturing an instrument scale and an automated line for its implementation.* Kolpakov V.I., Zinovenko V.S., Kirillov A.G., Sakevich V. N.; regist. 25.07.2019. (In Russ.)

## Информация об авторах / Information about the authors

**Татьяна Владимировна Бувевич**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры информационных систем  
и автоматизации производства,  
Витебский государственный  
технологический университет  
(Республика Беларусь, г. Витебск,  
Московский просп., 72)  
E-mail: buevih.tv@gmail.com

**Tat'yana V. Buevich**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of information systems and production automation,  
Vitebsk State Technological University  
(72 Moskovskiy avenue, Vitebsk, Republic of Belarus)

**Алексей Геннадьевич Кириллов**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры информационных систем  
и автоматизации производства,  
Витебский государственный  
технологический университет  
(Республика Беларусь, г. Витебск,  
Московский просп., 72)  
E-mail: kirillov.malp@gmail.com

**Aleksey G. Kirillov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of information systems and production automation,  
Vitebsk State Technological University  
(72 Moskovskiy avenue, Vitebsk, Republic of Belarus)

**Валерий Николаевич Сакевич**

доктор технических наук, профессор,  
доцент кафедры физики и технической механики,  
Витебский государственный  
технологический университет  
(Республика Беларусь, г. Витебск,  
Московский просп., 72)  
E-mail: igsakevich@yandex.ru

**Valeriy N. Sakevich**

Doctor of technical sciences, professor,  
associate professor of the sub-department  
of physics and technical mechanics,  
Vitebsk State Technological University  
(72 Moskovskiy avenue, Vitebsk, Republic of Belarus)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

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

**Поступила в редакцию/Received 22.04.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 23.05.2022**

**Принята к публикации/Accepted 22.06.2022**

УДК 531.714.2.

doi:10.21685/2307-5538-2022-3-12

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

А. А. Трофимов<sup>1</sup>, А. В. Гладков<sup>2</sup>, И. Е. Смирнов<sup>3</sup>, Д. М. Марков<sup>4</sup>, Н. В. Недопекин<sup>5</sup>

<sup>1,2,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1,3,4,5</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>2</sup> alexey.gladkov.1@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Несмотря на высокий современный уровень развития науки и техники проблемы физических измерений остаются актуальными из-за экстремальных условий эксплуатации первичных средств измерений (датчиков), какие имеют место в ракетно-космической технике, в том числе актуальны задачи измерения перемещений. Разработка датчика перемещений, работающего в условиях воздействия высоких температур до 600 °С, накладывает ограничения на используемые для изготовления катушек индуктивности материалы и провода, связанные с тем, что материалов, имеющих достаточную прочность и выдерживающих такие высокие температуры, немного (керамика, ситаллы). *Материалы и методы.* При решении поставленных задач использованы методы интегрального и дифференциального исчисления, теории электрических цепей и электромагнитного поля. При проектировании конструкций датчиков применялась система автоматизированного проектирования AutoCAD. *Результаты.* В результате проведенных работ по разработке датчика линейных перемещений получен большой технологический задел, необходимый для дальнейшего проведения работ по созданию высокотемпературных датчиков перемещений различных диапазонов измерений для изделий ракетно-космической техники.

**Ключевые слова:** керамическая подложка, датчик перемещений, токопроводящая спираль, катушка индуктивности

**Для цитирования:** Трофимов А. А., Гладков А. В., Смирнов И. Е., Марков Д. М., Недопекин Н. В. Технология изготовления высокотемпературного датчика линейных перемещений на основе металлокерамических катушек индуктивности // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 101–105. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-12

## THE ISSUE OF RESEARCH OF MANUFACTURING TECHNOLOGY OF HIGH-TEMPERATURE LINEAR DISPLACEMENT SENSOR BASED ON METAL-CERAMIC INDUCTANCE COILS

A.A. Trofimov<sup>1</sup>, A.V. Gladkov<sup>2</sup>, I.E. Smirnov<sup>3</sup>, D.M. Markov<sup>4</sup>, N.V. Nedopekin<sup>5</sup>

<sup>1,2,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>3</sup> St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>1,3,4,5</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>2</sup> alexey.gladkov.1@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* Despite the high modern level of science and technology development, the problems of physical measurements remain relevant due to extreme operating conditions of primary measuring instruments (sensors), which take place in the rocket-space technology, including the problems of measuring displacements. The development of a displacement sensor operating at high temperatures of up to 600 °C imposes restrictions on the materials and wires used to manufacture inductor coils, due to the fact that there are few materials that are sufficiently strong to withstand such high temperatures (ceramics, seals). *Materials and methods.* Methods of integral and differential calculus, theory of electric circuits and electromagnetic field were used to solve the tasks. A computer-aided design system was used in the design of sensor structures AutoCAD. *Results.* As a result of the conducted work on the development of a linear displacement sensor, a large technological reserve was obtained for further work on the creation of high-temperature displacement sensors with different measurement ranges for the products of rocket and space technology.

**Keywords:** ceramic substrate, motion sensor, conductive coil, inductance coil

**For citation:** Trofimov A.A., Gladkov A.V., Smirnov I.E., Markov D.M., Nedopekin N.V. The issue of research of manufacturing technology of high-temperature linear displacement sensor based on metal-ceramic inductance coils. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):101–105. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-12

Актуальной задачей при отработке новых типов двигательных установок является создание высокотемпературных бесконтактных датчиков перемещений, работоспособных при температурах окружающей среды от минус 100 до +600 °С, обладающих высокой стабильностью, точностью измерений и надежностью [1, 2].

Сложность создания таких датчиков обусловлена ограничениями на используемые материалы, отсутствием моточных проводов, изоляция которых выдерживает нагрев до температуры +600 °С без специальной защиты, а также необходимостью решения многочисленных технологических проблем.

Предельная рабочая температура электромагнитных датчиков перемещений с проволочными катушками индуктивности [3–6] ограничена возможностями конструктивных материалов (стеклотекстолит, клей, пропиточные лаки), а также предельно допустимой температурой моточного провода.

Для решения поставленной задачи предлагается электромагнитный датчик перемещений с использованием металлокерамических катушек индуктивности, выполненных на основе технологии изготовления многослойных керамических печатных плат и представляющих собой многослойную катушку индуктивности, сформированную последовательным нанесением на каждый слой керамической подложки токопроводящих спиралеобразных витков. Нанесение витков спирали на каждый слой керамической подложки осуществляется токопроводящей пастой на основе вольфрама и молибдена методом контактной печати для заполнения межспиральных переходов в подложке и методом трафаретной печати для получения спирали по плоскости подложки (рис. 1). Толщина керамической подложки выбирается исходя из условий обеспечения предъявляемых требований по механической прочности, изоляционным свойствам подложки после обжига и получения минимальной толщины многослойной керамической платы.

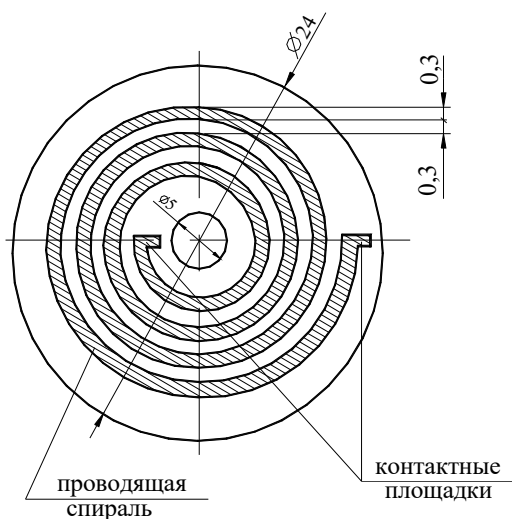


Рис. 1. Токопроводящая спираль

После нанесения токопроводящих витков (спиралей) на керамическую подложку формируют спрессованный монолит из требуемого количества металлизированных слоев и проводят обжиг монолита при температуре 1500–1600 °С. Для обеспечения электрического соединения полученной катушки индуктивности с другими элементами схемы или монтажными проводами предусматриваются никелевые контактные площадки, которые выведены на противоположные плоскости катушки и позволяют механически соединить контактные площадки проводниками или методами контактной сварки (рис. 2). Фотография металлокерамической обмотки индуктивности представлена на рис. 3.

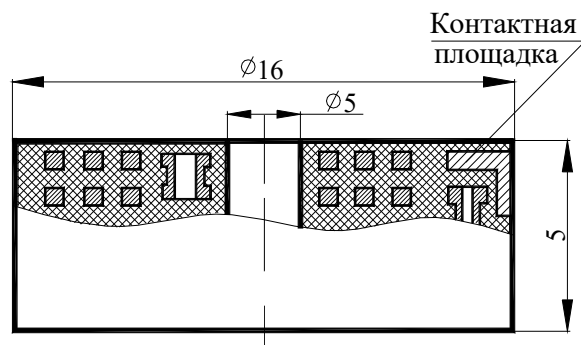


Рис. 2. Конструктивная схема металлокерамической обмотки индуктивности

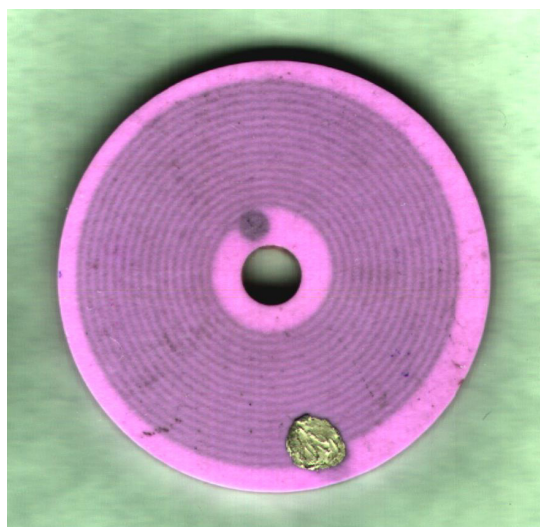


Рис. 3. Металлокерамическая обмотка индуктивности

Один из вариантов конструктивного исполнения высокотемпературного электромагнитного датчика перемещений трансформаторного типа на основе металлокерамических катушек индуктивности представлен на рис. 4.

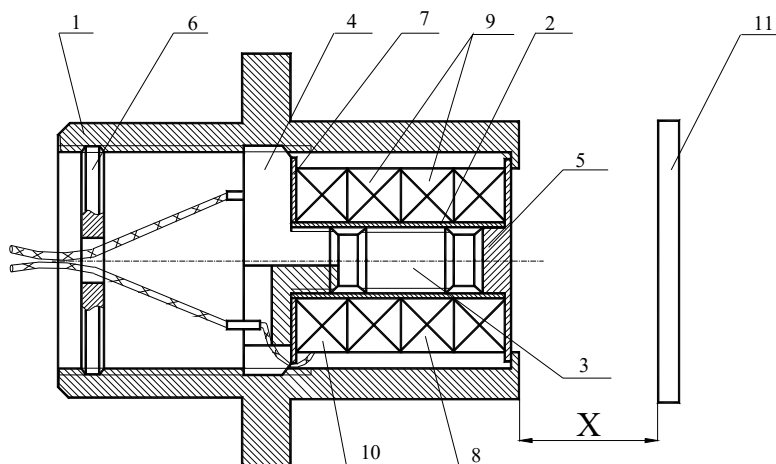


Рис. 4. Датчик линейных перемещений с металлокерамическими обмотками индуктивности

Датчик содержит ферромагнитный корпус 1, ферромагнитный сердечник 2 с резьбовым отверстием, в котором перемещается подстроечный винт 3, диамагнитные фланцы 4 и 5, компенсационную пластину 6, изоляционную шайбу 7, измерительную обмотку 8, обмотки питания 9 и компенсационную обмотку 10, ферромагнитный якорь 11.

Обмотки питания 9 соединены между собой последовательно-согласно и запитываются от генератора синусоидального тока, а измерительная 8 и компенсационная обмотка 10 соединены между собой последовательно-встречно.

Основные технические характеристики датчика:

- диапазон измерения перемещений 0...4 мм;
- диапазон рабочих температур от минус 100 до + 600 °С;
- основная погрешность не более 1 %.

Для подтверждения характеристик предлагаемого варианта конструктивного построения датчика были проведены экспериментальные исследования воздействия повышенной температуры (+420 °С) на металлокерамический чувствительный элемент. На рис. 5 представлены градуировочные характеристики предлагаемого датчика в нормальных условиях 1 и при температуре +420 °С – 2.

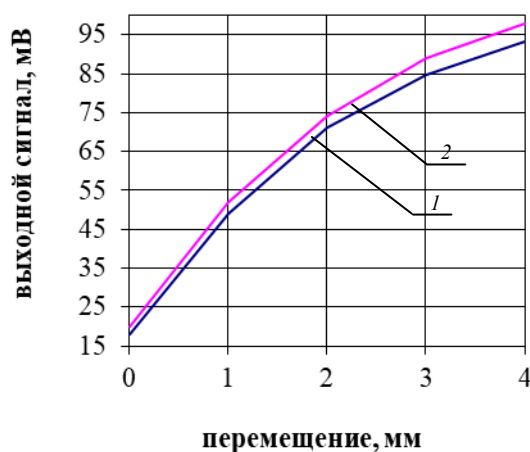


Рис. 5. Градуировочные характеристики предлагаемого датчика:  
1 – в нормальных условиях эксплуатации; 2 – при температуре +420 °С

Полученные технические и эксплуатационные характеристики в сочетании с простотой и технологичностью конструкции позволяют рекомендовать разработанный датчик при обработке новых типов двигательных установок.

#### Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
2. Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 24–27.
3. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18–21.
4. Трофимов А. А. Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.
5. Гаврилов В. А., Трофимов А. А. Система измерения линейных перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 44–46.
6. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : моногр. Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. 174 с.

#### References

1. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
2. Trofimov A.N., Trofimov A.A. Expansion of the temperature range of raster transformer displacement sensors. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2009;(6):24–27. (In Russ.)



3. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor structures for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;(10):18–21. (In Russ.)
4. Trofimov A.A. Konakov N.D. Transformer displacement sensors with an extended measurement range. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):8–10. (In Russ.)
5. Gavrilov V.A., Trofimov A.A. System for measuring linear displacements. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):44–46. (In Russ.)
6. Trofimov A.A., Trofimov A.N. *Vzaimoinduktivnye datchiki peremeshcheniy: monogr = Mutually inductive displacement sensors : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2009:174. (In Russ.)

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

##### **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 Владимирович Гладков**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: alexey.gladkov.1@yandex.ru

##### **Aleksey V. Gladkov**

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

##### **Иван Евгеньевич Смирнов**

ординатор кафедры общей хирургии,  
Санкт-Петербургский государственный  
университет  
(Россия, г. Санкт-Петербург,  
Менделеевская линия, 2)  
E-mail: iit@pnzgu.ru

##### **Ivan Evgen'evich Smirnov**

Resident of the sub-department of general surgery,  
St. Petersburg State University  
(2 Mendeleevskaya line, St. Petersburg, Russia)

##### **Дмитрий Максимович Марков**

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

##### **Dmitriy M. Markov**

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

##### **Никита Вячеславович Недопекин**

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

##### **Nikita V. Nedopekin**

Postgraduate student,  
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 12.05.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 13.06.2022**

**Принята к публикации/Accepted 18.07.2022**

УДК 004.932.2  
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-13

## ДИЗЪЮНКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ИНВАРИАНТА СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

А. В. Григорьев<sup>1</sup>, И. И. Кочегаров<sup>2</sup>, Н. К. Юрков<sup>3</sup>, Н. С. Реута<sup>4</sup>, С. А. Бростилов<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1, 2, 4, 5</sup> kipra@pnzgu.ru, <sup>3</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В настоящее время необходимым условием обеспечения безопасности распределенных природных и техногенных объектов является мониторинг этих объектов с целью идентификации их предаварийных состояний. *Материалы и методы.* Для контроля состояния объектов применялись методы бесконтактного оптического контроля уровня вибрационного сигнала объекта с помощью информационно-измерительных и управляющих систем, встраиваемых в существующие системы дистанционного зондирования Земли. *Результаты и выводы.* Проведен анализ состояния вопроса вибрационного мониторинга распределенных объектов. Обосновано практическое отсутствие методологических ограничений по частоте анализируемых вибраций для информационно-измерительных и управляющих систем, анализирующих изображения тестовых сегментов с вибрационным размытием. Обоснована субпиксельная точность анализаторов вибрационного приращения площади изображения круглой метки. Предложен метод оценивания общего уровня интенсивности вибрации по сложным траекториям, основанный на замещении реального вибрационного процесса эквивалентным прямолинейным вибрационным перемещением в плоскости объекта, при котором обеспечивается равное реальному относительное вибрационное приращение количества пикселей, формирующих изображение тестового сегмента круглой формы с вибрационным размытием. Предложена новая дизъюнктивная модель формирования следа вибрационного размытия изображения тестового сегмента круглой формы.

**Ключевые слова:** круглая метка, вибрационная диагностика, предаварийные состояния, природные и техногенные объекты, распределенные системы, инвариант, анализ, дистанционное зондирование Земли

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, номер проекта 20-38-90149.

**Для цитирования:** Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С., Бростилов С. А. Дизъюнктивная модель инварианта состояния объекта контроля // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 106–113. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-13

## DISJUNCTIVE MODEL OF THE INVARIANT CONTROL OBJECT STATUS

A.V. Grigor'ev<sup>1</sup>, I.I. Kochegarov<sup>2</sup>, N.K. Yurkov<sup>3</sup>, N.S. Reuta<sup>4</sup>, S.A. Brostilov<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1, 2, 4, 5</sup> kipra@pnzgu.ru, <sup>3</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Currently, a necessary condition for ensuring the safety of distributed natural and man-made objects is the monitoring of these objects in order to identify their pre-emergency conditions. *Materials and methods.* To control the state of objects, methods of non-contact optical control of the level of the vibration signal of the object were used with the help of IMMS, built into existing systems for remote sensing of the Earth. *Results and conclusions.* The state of the issue of vibration monitoring of distributed objects was analyzed. The practical absence of methodological restrictions on the frequency of the analyzed vibrations for IMMS analyzing images of test segments with vibrational blur is substantiated. The subpixel accuracy of the analyzers of the vibrational increment of the image area of a round mark is substantiated. A method for estimating the overall level of vibration intensity along complex trajectories is proposed, based on replacing the real vibration process with an equivalent rectilinear vibrational movement in the object plane, which provides an equal relative vibrational increment in the number of pixels that form an image of a round test segment with vibrational blur. A new disjunctive model for the formation of a trace of vibrational blurring of the image of a test segment of a round shape is proposed.

**Keywords:** round mark, vibration diagnostics, pre-accident conditions, natural and man-made objects, distributed systems, invariant, analysis, Earth remote sensing

**Acknowledgments:** the study was carried out with the financial support of the RFBR, project number 20-38-90149.

**For citation:** Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S., Brostilov S.A. Disjunctive model of the invariant control object status. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):106–113. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-13

### *Введение*

В настоящее время количество природных и техногенных катастроф, регистрируемых в течение заданного временного интервала, неуклонно повышается. Теория катастроф говорит о том, что приближающаяся аварийная ситуация в распределенных природных и техногенных системах характеризуется ростом вибрационной активности исследуемой системы.

При разработке информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) для вибрационного мониторинга распределенных объектов актуальна проблема адаптивности мониторинговой системы [1].

В период, когда объект контроля далек от предаварийного состояния, амплитуды параметров его вибраций весьма малы, а частоты весьма высоки. По мере приближения аварийной ситуации частота вибраций снижается, а их интенсивность возрастает. Для идентификации предаварийных ситуаций часто бывает достаточно измерять вибрации частотой до 60 кГц и амплитудой вибрационного процесса не более 10 мкм<sup>1</sup>.

Методы измерения вибраций подразделяются на контактные и бесконтактные. Контактные методы основаны на том, что к объекту контроля крепится контактный датчик, который при растяжении-сжатии формирует электрический сигнал, пропорциональный силе воздействия на него. Такой датчик обладает инерционностью: он формирует дискретные отсчеты интенсивности вибрационного процесса через определенный временной интервал. В соответствии с теоремой Котельникова верхняя граничная частота измеряемой вибрации обратна удвоенному временному интервалу между двумя измерениями. А интервал между измерениями не может быть меньше времени преобразования усиления, в противном случае динамическая погрешность не позволит интерпретировать эти результаты как независимые [2]. В результате граничная частота вибрации, измеряемой контактными датчиками, не превышает 10 кГц (ГОСТ 32106–2013).

К бесконтактным методам измерения вибрации относятся методы лазерной виброметрии, основанные на явлении интерференции монохроматического света или на эффекте Доплера. Эти методы так же, как и описанные выше контактные, представляют информацию в виде дискретных отсчетов. Поэтому их верхняя граничная частота также обратна удвоенному значению интервала между этими отсчетами. Эта верхняя предельная частота измеряемой лазерными датчиками вибрации не превышает 10–15 кГц [3].

Выбор контактных датчиковых и бесконтактных лазерных вибрационных анализаторов в качестве систем мониторинга состояния распределенных объектов не представляется рациональным еще и потому, что размещение большого числа таких датчиков на распределенных объектах, считывание и анализ с них информации представляется сложной задачей, все решения которой являются затратными и малоэффективными, обладающими низкой надежностью и неустойчивыми к внешним природным и антропогенным воздействиям.

### *Применение параметров вибрационного размытия изображений сегментов в качестве инвариантов состояния распределенных объектов*

Наиболее рациональным представляется применение систем, использующих в качестве инварианта интенсивности вибрационного воздействия различные параметры размытия тестовых сегментов, нанесенных на поверхность объекта. Информацию об интенсивности вибрационного процесса несет само размытое пятно, поэтому дискретизации при преобразовании вибрационного сигнала не происходит. В результате верхней граничной частоты анализируемого вибрационного сигнала практически нет. Распределенный объект обвешивать датчиками тоже нет необходимости. ИИУС для мониторинга состояния распределенных объектов может быть встроена в существующую систему дистанционного зондирования Земли космического или воздушного базирования.

Классический способ, реализующий данный подход, получил название «мерный клин» [4]. Для осуществления измерения вибрации по этому способу на контролируемую поверхность наносят тестовый объект в виде клина. Мерный клин наносят с таким расчетом, чтобы ожидаемая вибрация была направлена перпендикулярно основанию клина. При этом перемещение угловой точки во много раз превышает размах вибрации. К недостаткам этого метода следует

<sup>1</sup> ГОСТ 32106–2013. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосов и компрессорных агрегатов.

отнести требование, чтобы вибрация была перпендикулярна основанию клина. В реальных контролируемых системах это условие часто не может быть выполнено.

Вибрационное перемещение реальной точки на поверхности реального объекта контроля осуществляется, как правило, не по прямолинейной, а по эллиптической или еще более сложной траектории. Поэтому большую информативность обеспечит размытие тестового сегмента не клиновидной формы, а такой формы, для которой все направления инвариантны, т.е. круглой.

Способы измерения вибрации, основанные на анализе размытия изображения круглой формы, известны [5–7]. Способ, представленный в работе [3], получил дальнейшее развитие в статье [8]. Перечисленные способы основаны на измерении линейных фрагментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Вопросы восстановления геометрических параметров следа вибрационного размытия изображения круглой метки рассмотрены в статье [9]. В статье [10] представлен алгоритм поиска периферийных точек главного линейного сечения следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Предметный анализ и обобщение этих способов применительно к задаче измерения вибрационных перемещений исследуемой точки на поверхности объекта контроля приведены в статье [11].

Недостатком этих методов является то, что погрешность измерения не может быть меньше расстояния между центрами соседствующих друг с другом пикселей в строке или столбце раstra регистрирующего устройства, т.е. меньше размера самого пиксела. Способ [12] позволяет получать субпиксельную точность, потому что измерительным сигналом для оценки интенсивности вибрационного процесса в нем является вибрационное приращение площади изображения круглой метки.

Наиболее эффективным представляется вариант многократного измерения площади изображения круглой метки с последующим вычислением инварианта интенсивности вибрационного процесса и статистической обработкой массива полученных результатов [13]. Исследование возможности применения вибрационного размытия изображения круглой метки для контроля технического состояния движущихся механизмов проведено в статье [14]. Принципы контроля технического состояния движущихся механизмов на основе анализа динамики вибрационного размытия изображения круглой метки изложены в статье [15].

#### *Амплитуда эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения как оценочный характеристический параметр общей интенсивности вибрации объекта контроля*

Предлагаемая в настоящей статье модель является логическим развитием метода, предложенного в патенте [12]. Общая интенсивность вибрационного процесса в этой модели оценивается амплитудой эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения в плоскости объекта. Эквивалентным такое перемещение является потому, что при нем вибрационное приращение площади изображения круглой метки становится таким же, как и при исследуемом перемещении. На рис. 1 представлена схема реализации эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения исследуемой точки на поверхности объекта контроля.

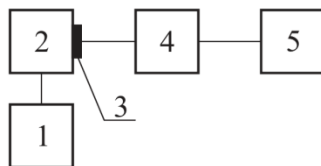


Рис. 1. Схема реализации эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения исследуемой точки на поверхности объекта контроля

Источник эквивалентного вибрационного сигнала 1 создает гармоническое механическое колебание, в результате которого несущая конструкция в форме прямоугольного параллелепипеда 2 с нанесенным на ее боковой грани тестовым сегментом круглой формы (круглой меткой) 3 перемещается в плоскости объекта. Регистрирующее устройство 4 формирует изображения круглой метки без вибрационного размытия и с таковым, которые передаются для обработки в вычислительное устройство 5. Интенсивность реального вибрационного сигнала оценивается амплитудой эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения, т.е. такой амплитудой прямолинейного вибрационного перемещения в плоскости объекта, при котором вибрационное приращение площади изображения круглой метки становится равным

вибрационному приращению площади изображения круглой метки при воздействии реальным вибрационным сигналом.

Из принципа геометрического подобия изображения оригиналу следует, что

$$\frac{r_t}{l_0} = \frac{A_x}{L_x}, \quad (1)$$

где  $r_t$  – радиус оригинала круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля;  $l_0$  – радиус изображения круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля;  $A_x$  – амплитуда вибрационного перемещения исследуемой точки на поверхности объекта контроля;  $L_x$  – амплитуда вибрационного перемещения изображения исследуемой точки на поверхности объекта контроля.

Радиус  $r_t$  оригинала круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля представлен в единицах измерения длины, например, в микрометрах. Радиус  $l_0$  изображения круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля представлен в пикселах (*pix*). Эта единица измерения расстояния на изображении представляет собой расстояние между центрами соседствующих друг с другом пикселей в строке или столбце раstra регистрирующего устройства. Таким образом, величина  $l_0$  показывает, во сколько раз радиус изображения круглой метки превышает расстояние между центрами соседних пикселей. Величины  $A_x$  и  $L_x$  представлены в тех же единицах измерения, что  $r_t$  и  $l_0$  соответственно.

По определению, площадь  $\Delta S_{imtx}$  вибрационного приращения площади изображения круглой метки равна разности между площадью изображения круглой метки  $S_{imtx}$  с вибрационным размытием и площадью изображения круглой метки  $S_{imt0}$  без вибрационного размытия, т.е.

$$\Delta S_{imtx} = S_{imtx} - S_{imt0}. \quad (2)$$

#### *Дизъюнкция позиций прямолинейного вибрационного перемещения в плоскости объекта*

Тестовый сегмент круглой формы, в центре которого расположена исследуемая точка поверхности объекта контроля, совершает вибрационное перемещение. В каждый момент времени указанный тестовый сегмент излучает элементарный первичный или отраженный световой поток в сторону регистрирующего устройства. Каждая частица (фотон) этого светового потока преобразуется в элементарную порцию заряда в ячейке матрицы, например, прибора с зарядовой связью. В результате с каждой мгновенной фотографии в каждой элементарной позиции поступает энергия, участвующая в формировании зарядового рельефа, соответствующего следу вибрационного размытия изображения круглой метки. Таким образом, след вибрационного размытия изображения круглой метки понимается как объединение (дизъюнкция) мгновенных фотографий круглой метки при стремлении интервала между этими фотографиями к нулю. Полученная в результате модель следа вибрационного размытия изображения круглой метки является дизъюнктивной.

Дизъюнктивная модель прямолинейного вибрационного перемещения изображения круглой метки представлена на рис. 2.

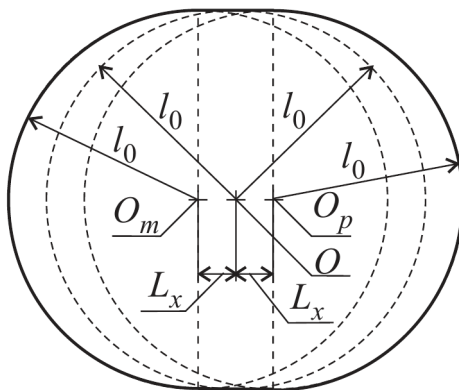


Рис. 2. Дизъюнктивная модель прямолинейного вибрационного перемещения изображения круглой метки

На рис. 2 штриховыми окружностями показаны контуры изображения круглой метки на исходной и крайней позициях вибрационного перемещения:  $O$  – положение исследуемой точки на исходной позиции вибрационного перемещения;  $O_m$ ,  $O_p$  – положения движущегося изображения исследуемой точки в крайних позициях вибрационного перемещения. Из рис. 2 следует, что след вибрационного размытия изображения круглой метки состоит из трех сегментов: левого полукруга, правого полукруга и центрального прямоугольника. Суммарная площадь первых двух указанных сегментов равна площади изображения круглой метки на исходной позиции  $S_{imt0}$ . Последний из названных сегментов является вибрационным приращением изображения круглой метки  $\Delta S_{imtx}$ .

**Относительное вибрационное приращение площади изображения  
круглой метки как инвариант состояния объекта контроля**

Таким образом, из рис. 2 видно

$$\Delta S_{imtx} = 4l_0 L_x. \quad (3)$$

Отсюда

$$L_x = \frac{\Delta S_{imtx}}{4l_0}. \quad (4)$$

Принимая во внимание (2),

$$L_x = \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{4l_0}. \quad (5)$$

Из формулы (1) следует, что

$$A_x = \frac{r_t L_x}{l_0}. \quad (6)$$

Отсюда, принимая во внимание формулу (5),

$$A_x = \frac{r_t}{l_0} \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{4l_0}. \quad (7)$$

Следовательно,

$$A_x = r_t \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{4l_0^2}. \quad (8)$$

А поскольку  $l_0$  является радиусом изображения круглой метки без вибрационного размытия, а  $S_{imt0}$  – площадь такого изображения:

$$S_{imt0} = \pi l_0^2. \quad (9)$$

Отсюда, принимая во внимание формулу (8),

$$A_x = r_t \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{4S_{imt0}} \pi \quad (10)$$

или

$$A_x = r_t \frac{\pi}{4} \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{S_{imt0}}. \quad (11)$$

А поскольку

$$\delta S_{imtx} = \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{S_{imt0}}, \quad (12)$$

где  $\delta S_{imtx}$  – относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки – принимая во внимание (11),

$$A_x = r_t \frac{\pi}{4} \delta S_{imtx} . \quad (13)$$

Таким образом, амплитуда вибрационного перемещения исследуемой точки прямо пропорциональна относительному вибрационному приращению изображения круглой метки. Сказанное относится не только к прямолинейному вибрационному перемещению, но и к вибрационному перемещению по любой траектории. Из этого следует, что относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки является инвариантом интенсивности вибрационного процесса и, следовательно, инвариантом состояния объекта контроля, с помощью которого возможна идентификация его предаварийного состояния.

### Заключение

В статье обоснованы актуальность проблемы идентификации предаварийных состояний распределенных природных и техногенных систем и ключевая роль методов вибрационной диагностики при ее решении. Проведен предметный сравнительный анализ методов оценки интенсивности вибрационного сигнала. Проанализирован и обобщен опыт применения параметров вибрационного размытия изображений для оценки общей интенсивности вибраций. Обоснована целесообразность применения амплитуды эквивалентного прямолинейного вибрационного перемещения в качестве оценочного характеристического параметра общей интенсивности вибрации объекта контроля. Приведен и проанализирован пример дизъюнкции позиций прямолинейного вибрационного перемещения в плоскости объекта. Исследована возможность применения относительного вибрационного приращения площади изображения круглой метки в качестве инварианта состояния объекта контроля.

### Список литературы

1. Калашников В. С., Лысенко А. В., Таньков Г. В. [и др.]. Формирование управляющего сигнала адаптивной информационно-измерительной и управляющей системы вибрационных испытаний // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 90–97. doi:10.21685/2307-4205-2020-4-10
2. Козырев Г. И., Кравцов А. Н., Усиков В. Д. Расчет частоты опроса в многоканальных информационно-измерительных системах с единых энергетических и точностных позиций // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 14–21. doi:10.21685/2307-5538-2020-2-2
3. Основы измерения вибрации. По материалам фирмы DLI / под ред. В. А. Смирнова. URL: [http://www.vibration.ru/osn\\_vibracii.shtml](http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml) (дата обращения: 14.06.2022).
4. Иориш Ю. И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. Издание второе перераб. и доп. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. 773 с.
5. Патент 2535237 Российская Федерация. 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 А. В.; № 2013128327/28; заявл. 20.06.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
6. Патент 2535522 Российская Федерация. 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 А. В.; № 2013128329/28; заявл. 20.06.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.
7. Патент 2726270 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С.; № 2019136327; заявл. 12.11.2019; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 19.
8. Grigor'ev A. V., Zatytkin A. V., Yurkov N. K. Method for contactless three-component vibration measurement // Measurement Techniques. 2017. Vol. 59. P. 1291–1296. doi:10.1007/s11018-017-1131-5
9. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. [и др.]. Восстановление геометрических параметров следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 2. С. 32–35.
10. Григорьев А. В., Гришко А. К., Данилова Е. А. [и др.]. Поиск периферийных точек главного линейного сечения следа вибрационного размытия изображения круглой метки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 2. С. 35–38.
11. Grigoriev A. V., Danilova E. A., Yurkov N. K. Method of measurement vibration movements of material points on the surface of the controlled object // Proceedings of the 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM-2017. 2017. P. 589–592.

12. Патент 2765336 Российская Федерация. Способ контроля технического состояния механизмов / Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С. ; № 2021107352 ; заявл. 19.03.2021 ; опублик. 28.01.2022, Бюл. № 4.
13. 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. doi:10.21685/2307-4205-2020-3-7
14. 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.
15. Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К. Принципы контроля технического состояния движущихся механизмов на основе анализа динамики вибрационного размытия изображения круглой метки // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2020. № 2. С. 119–131.

### References

1. Kalashnikov V.S., Lysenko A.V., Tan'kov G.V. et al. Formation of the control signal of the adaptive information-measuring and control system of vibration tests. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):90–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2020-4-10
2. Kozyrev G.I., Kravtsov A.N., Usikov V.D. Calculation of the polling frequency in multichannel information and measurement systems from unified energy and accuracy positions. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2020;(2):14–21. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2020-2-2
3. Smirnova V.A. (ed.). *Osnovy izmereniya vibratsii. Po materialam firmy DLI = Fundamentals of vibration measurement. Based on the materials of the DLI company*. (In Russ.). Available at: [http://www.vibration.ru/osn\\_vibracii.shtml](http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml) (accessed 14.06.2022).
4. Iorish Yu.I. *Vibrometriya. Izmerenie vibratsii i udarov. Obshchaya teoriya, metody i pribory. Izdanie vtoroe pererabotannoe i dopolnennoe = Vibrometry. Measurement of vibration and shock. General theory, methods and devices. The second edition was revised and supplemented*. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury, 1963:773. (In Russ.)
5. Patent 2535237 Russian Federation. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach A.V.; № 2013128327/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
6. Patent 2535522 Russian Federation. *Sposob izmereniya vibratsiy = Method of measuring vibrations*. Drzhevetskiy A.L., Yurkov N.K., Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Kochegarov I.I., Kuznetsov S.V., Drzhevetskiy Yu.A., Derkach A.V.; № 2013128329/28; appl. 20.06.2013; publ. 10.12.2014, Bull. № 34. (In Russ.)
7. Patent 2726270 Russian Federation. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya mekhanizmov = A method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S.; № 2019136327; appl. 12.11.2019; publ. 10.07.2020, Bull. № 19. (In Russ.)
8. Grigor'ev A.V., Zatytkin A.V., Yurkov N.K. Method for contactless three-component vibration measurement. *Measurement Techniques*. 2017;59:1291–1296. doi:10.1007/s11018-017-1131-5
9. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Restoration of geometric parameters 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*. 2021;2:32–35. (In Russ.)
10. Grigor'ev A.V., Grishko A.K., Danilova E.A. et al. Search for peripheral points of the main linear section of the trace of vibrational blurring of the image of a circular mark. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;2:35–38. (In Russ.)
11. Grigoriev A.V., Danilova E.A., Yurkov N.K. Method of measurement vibration movements of material points on the surface of the controlled object. *Proceedings of the 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM-2017*. 2017:589–592.
12. Patent 2765336 Russian Federation. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya mekhanizmov = A method for monitoring the technical condition of mechanisms*. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Reuta N.S.; № 2021107352; appl. 19.03.2021; publ. 28.01.2022, Bull. № 4. (In Russ.)
13. 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 system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):55–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2020-3-7



14. Grigoriev A.V., Kochtgarov 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.
15. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. Principles of monitoring the technical condition of moving mechanisms based on the analysis of the dynamics of vibration blurring of the image of a round mark. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii = Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 2020;(2):119–131. (In Russ.)

**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: kipra@pnzgu.ru

**Aleksey V. Grigor'ev**

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)

**Игорь Иванович Кочегаров**

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

**Igor' I. Kochegarov**

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,  
заслуженный деятель науки РФ,  
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,  
the honoured worker of science  
of the Russian Federation,  
head of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Никита Сергеевич Реута**

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

**Nikita S. Reuta**

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

**Сергей Александрович Бростилов**

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

**Sergey A. Brostilov**

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 16.05.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 16.06.2022**

**Принята к публикации/Accepted 18.07.2022**

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

УДК 61.13058

doi:10.21685/2307-5538-2022-3-14

## КОНТРОЛЬ И КОРРЕКЦИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА

С. Ю. Тверская<sup>1</sup>, А. Ю. Тычков<sup>2</sup>, А. П. Назарычев<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup> tverskaya\_sofya@mail.ru, <sup>2</sup> tychkov-a@mail.ru, <sup>3</sup> naz\_artem@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Внедрение новых технологий облегчает повседневную жизнь, но в то же время усиливает воздействие на нервную систему человека, что в свою очередь негативно сказывается на его здоровье, качестве жизни и работоспособности. Целью работы является разработка методики контроля и коррекции информативных параметров физиологической активности головного мозга за счет применения известных и новых оригинальных подходов восстановления нервной системы в условиях продолжительного стресса. *Материалы и методы.* В работе приведен обзор систем регистрации и коррекции параметров физиологической активности головного мозга, а также предложена методика контроля и коррекции физиологических параметров активности головного мозга. Предлагается использовать новые и усовершенствованные методы цифровой обработки физиологических сигналов головного мозга для обеспечения автоматизации процесса анализа сигналов врачом. *Результаты и выводы.* Разработана методика контроля и коррекции физиологических параметров активности головного мозга, обеспечивающая регистрацию физиологических сигналов головного мозга по восьми отведениям, хранение и цифровую обработку, анализ информативных параметров и принятие решения.

**Ключевые слова:** электроэнцефалограмма, информативные параметры, контроль и коррекция, физиологическая активность

**Для цитирования:** Тверская С. Ю., Тычков А. Ю., Назарычев А. П. Контроль и коррекция информативных параметров физиологической активности головного мозга // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 114–120. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-14

## CONTROL AND CORRECTION OF INFORMATIVE PARAMETERS OF PHYSIOLOGICAL ACTIVITY OF THE BRAIN

S.Yu. Tverskaya<sup>1</sup>, A.Yu. Tychkov<sup>2</sup>, A.P. Nazarychev<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup> tverskaya\_sofya@mail.ru, <sup>2</sup> tychkov-a@mail.ru, <sup>3</sup> naz\_artem@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The introduction of new technologies makes everyday life easier, but at the same time increases the impact on the human nervous system, which in turn negatively affects his health, quality of life and performance. The aim of the work is to develop a technique for monitoring and correcting the informative parameters of the physiological activity of the brain through the use of known and new original approaches to restore the nervous system under conditions of prolonged stress. *Materials and methods.* The paper provides an overview of systems for recording and correcting the parameters of the physiological activity of the brain, as well as a method for monitoring and correcting the physiological parameters of brain activity. It is proposed to use new and improved methods of digital processing of physiological signals of the brain to ensure automation of the signal analysis process by a doctor. *Results and conclu-*

sions. A technique for monitoring and correcting the physiological parameters of brain activity has been developed, which ensures the registration of physiological signals of the brain in eight leads, storage and digital processing, analysis of informative parameters and decision making.

**Keywords:** electroencephalogram, informative parameters, control and correction, physiological activity

**For citation:** Tverskaya S.Yu., Tychkov A.Yu., Nazarychev A.P. Control and correction of informative parameters of physiological activity of the brain. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):114–120. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-14

### *Введение*

Человек постоянно взаимодействует с окружающим миром и ежедневно соприкасается с проблемами, стрессом, которые имеют отрицательное значение, в результате чего возникают эмоциональные перегрузки. Однако на стресс каждый человек реагирует по-разному, это зависит от его возраста, уровня образования, интеллекта, эмоциональных возможностей и многого другого.

Известны три стадии становления эмоционального перенапряжения [1]. Первая – это тревога, с которой встречается человек почти каждый день в результате взаимодействия с окружающим миром (например, на работе или дома). В то же время происходит мобилизация человеческого организма. Вторая стадия – сопротивление организма, когда человек еще готов преодолеть трудности, но отсутствует душевный подъем, самочувствие ухудшается, появляется ощущение слабости и т.д. Третья стадия – истощение, когда стресс становится продолжительным по времени, т.е. физические и психологические механизмы человека сломлены и организму требуется медицинская помощь. На последней стадии возникают неврозы и депрессивные состояния, различные тревожно-фобические расстройства.

В лечебной практике разделилось мнение относительно выбора инструмента лечения человека с высоким уровнем эмоционального напряжения: лекарственные или физиотерапевтические [2–4]. Однако применение лекарственных препаратов может вызвать много сопутствующих заболеваний, контроль за которыми не всегда возможно осуществить в период реабилитации или лечения пациента. Известно множество видов физиотерапевтического воздействия [5, 6]: вибрационное, акустическое, электромагнитное, визуальное и их комбинации. По мнению авторов [7, 8], физиологическое или внешнее воздействие позволяет относительно безопасно нормализовать эмоциональное состояние человека за короткий период времени.

Внешнее воздействие на человека без учета и контроля эмоционального состояния специалистом может привести к ухудшению состояния здоровья. Необходимо проведение дополнительной диагностики, которая позволит объективно оценивать изменения в организме. Для проведения диагностики физиологического состояния человека лучше всего использовать инструментальные методы исследования [9]. Среди таких методов популярность получили электрофизиологические, самым доступным и распространенным среди которых является электроэнцефалография [9].

### *Системы регистрации физиологических параметров головного мозга*

Метод электроэнцефалографии позволяет регистрировать физиологические параметры головного мозга и отображать их на кривой – электроэнцефалографический сигнал (ЭЭС). ЭЭС представляет собой сложноструктурированный и нестационарный сигнал, регистрируемый с поверхности головного мозга человека [10].

Формирование ЭЭС осуществляется путем регистрации разности потенциалов между двумя точками (электродами) на поверхности головы человека: положительный и отрицательный вход канала усиления. Полученный сигнал представляет собой сумму простых электрических сигналов. ЭЭС рассматривают как обычные колебательные процессы в виде отдельных ритмов по частоте, амплитуде и фазе. Ритм представляет собой определенный тип электрической активности, соответствующий конкретному состоянию мозга [11–13].

Для регистрации ЭЭС используются различные системы, отличающиеся по чувствительности, скорости регистрации, числу каналов и по монтажу электродов [9, 14].

По числу каналов: регистрация ЭЭС начинается с 8 каналов, минимальное количество точек для обхвата всех областей мозга. В настоящее время существуют 8, 16, 21, 32 и более каналные энцефалографы. Для дополнительного анализа вводят каналы ЭКГ, ЭМГ и дополнительные расширения, а именно видео-ЭЭГ, ПСГ, ЭМГ, АЭЭГ.

Благодаря методу электроэнцефалографии и дальнейшей цифровой обработке ЭЭС стало возможным быстрое выявление отклонений в работе мозга и изменений параметров головного мозга в зависимости от внешнего воздействия на него.

### *Системы коррекции физиологической активности работы головного мозга*

Для коррекции эмоционального состояния человека в настоящее время применяются системы внешнего воздействия или коррекции. Это совокупность устройств, оказывающих внешнее неинвазивное (визуальное, аудиальное, вибрационное и т.д.) воздействие на организм человека [15–17].

Любое неинвазивное воздействие на человеческий организм изменяет электрофизиологическую активность [18]. Различают следующие виды воздействия: визуальное [5], аудиальное (или музыкальное) [6], световое [7], вибрационное [8].

Считается [19], что аудиовизуальное воздействие (АВС) позволяет быстрее восстановить уровень психоэмоционального состояния, поддерживать высокую работоспособность в течение длительного времени, запоминать больше информации.

Внешняя стимуляция осуществляется системой воздействия за счет комбинации ритмов, тонов и специальных музыкальных эффектов, а также калейдоскопических эффектов световой стимуляции.

Для осуществления аудиовизуального воздействия авторами настоящей статьи выбрана система АВС МАЙНД машина Nova pro 100 photosonix [20]. В системе представлено 100 режимов внешнего воздействия, в которых сочетаются ритмы, частота музыки, световая стимуляция. В зависимости от режимов работы системы реакция организма может меняться.

Система воздействия оказывает влияние в следующие диапазоны частот, которые соответствуют известным ритмам на ЭЭС:

- бета-ритм 13–30+ Гц. Соответствует состоянию организма человека в режиме бодрствования;
- альфа-ритм 8–12 Гц. Соответствует состоянию организма человека во время расслабления;
- тета-ритм 3–7 Гц. Соответствует состоянию организма человека во время засыпания или во время творчества;
- дельта-ритм 0,5–2 Гц. Соответствует состоянию человека во время сна.

В системе воздействия возможен выбор нескольких вариантов звукового стимулирующего тона:

- пульсирующая частота;
- пульсирующий розовый шум;
- пульсирующие различные типы аккордов;
- бинауральные биения;
- бинауральные биения с розовым шумом;
- двойные бинауральные биения;
- двойные моноуральные биения.

### *Методика контроля и коррекции информативных параметров физиологической активности головного мозга*

Использование приборов АВС для восстановления эмоционального состояния человека – явление распространенное. Однако использование подобных систем, без контроля со стороны медицинского персонала или специалистов, может привести к непоправимым последствиям.

Авторами настоящей статьи предложена методика обработки и коррекции информативных параметров физиологической активности головного мозга (рис. 1).

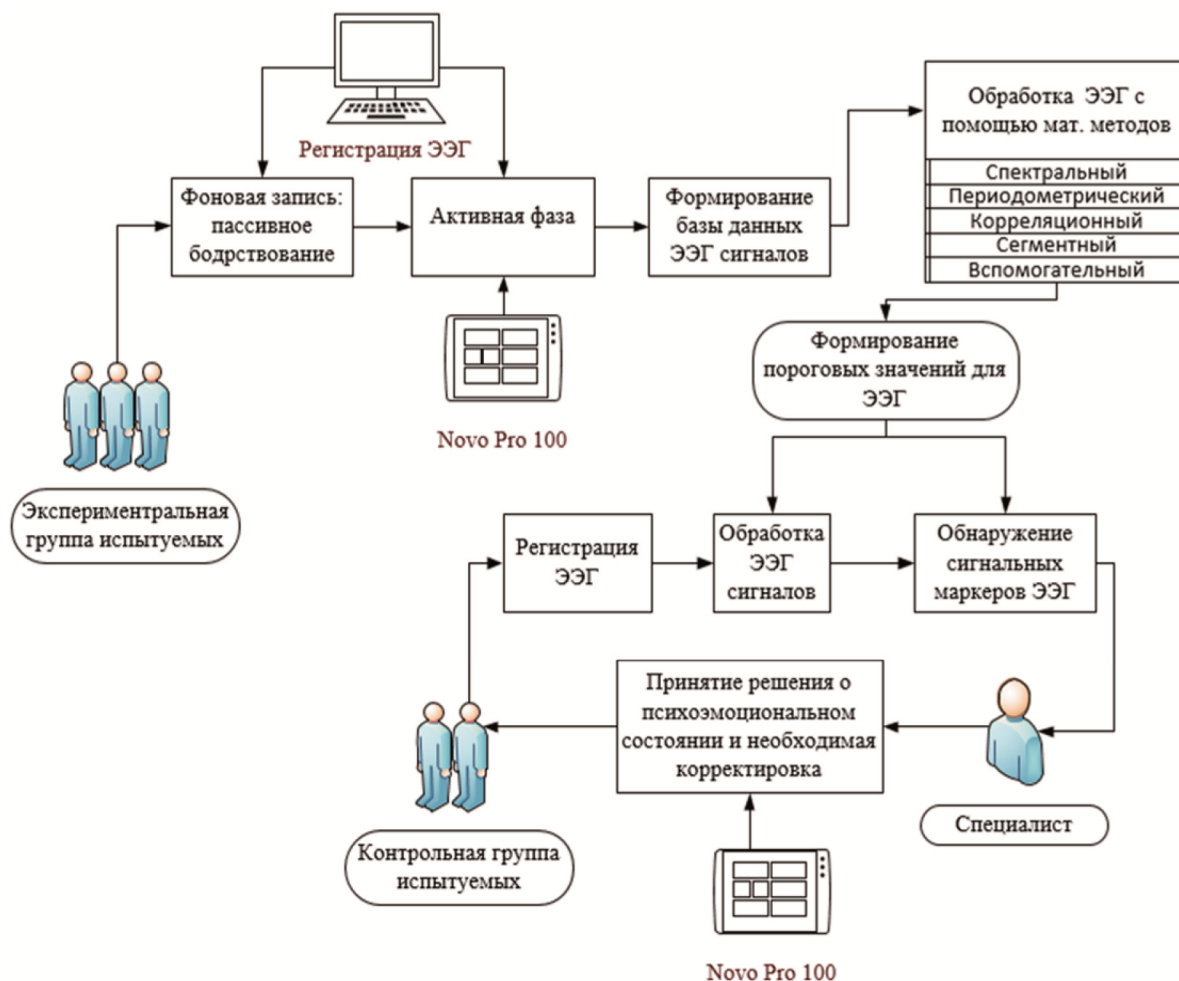


Рис. 1. Методика обработки и коррекции информативных параметров физиологической активности головного мозга

В предложенной методике обработки и коррекции медицинских сигналов для исследования эмоционального состояния здоровья человека выполняется следующая последовательность этапов:

Этап 1. Регистрация ЭЭС с помощью электроэнцефалографа. Регистрация ЭЭС проводится для группы лиц для сравнения: до и после воздействия. Из этих сигналов формируется база данных для последующего математического анализа и для обработки результатов специалистом.

Этап 2. Обработка ЭЭС с помощью математических методов. Анализ, подавление помех и выделение информативных параметров сигналов. Включает в себя различные методы цифровой обработки ЭЭС, таких как вейвлет- и Фурье-преобразование, корреляционный и периодометрический анализ. Данные методы являются наиболее распространенными и известными для решения поставленных в рамках этапов функционирования методики задач. Далее идет формирование пороговых значений для ЭЭС.

Этап 3. Обнаружение сигнальных маркеров – выделение информативных участков исследуемых ЭЭС, распознавание и анализ сигнальных маркеров.

Этап 4. Подбор программы коррекции. Решение о корректировке принимается специалистом по результатам анализа. Он опирается на результаты исследования медицинских данных и признаки состояния эмоционального здоровья пациента.

Представленная методика основывается на сочетании различных методов и способов обработки и анализа исследуемых медицинских сигналов. В основе представленной методики на этапах предварительной обработки и определения сигнальных маркеров исследуемых медицинских сигналов предложено использовать спектральные методы анализа [21].

### Заключение

Разработанная методика обработки и коррекции медицинских сигналов для исследования эмоционального состояния здоровья человека помогает нормализовать эмоциональное состояние человека без медицинского вмешательства. Проанализировав нормальное и стабильное состояние человека во время стресса с помощью внешнего визуального/аудиального воздействия, можно подобрать программу для восстановления оптимального состояния человека. В дальнейшем авторами будет проведено исследование по данной методике на группе добровольцев.

### Список литературы

1. Паточкина Н. А., Комелькова М. В., Цейликман О. Б., Лапшин М. С. Стресс: психологические, биохимические и психофизиологические аспекты : учеб. пособие. Челябинск, 2017. 82 с.
2. Зенков Л. Р., Ронкин М. А. Функциональная диагностика нервных болезней. М. : Медицина, 1991. 640 с.
3. Ефремова М. В. Анализ методов оценки психоэмоционального состояния человека // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : сб. материалов заочных науч.-практ. конф. Владимир, 2020. С. 105–109.
4. Гавря Н. Р., Вишневецкий В. Ю. Система оценки функционального состояния человека на основе ЭЭГ // Информационные технологии, системный анализ и управление : сб. тр. XVIII Всерос. науч. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов : в 3 т. Ростов н/Д. ; Таганрог (ИТСАУ), 2020. С. 168–171.
5. Дюк В. А., Кравчик М. Р., Сенкевич Ю. И. Обнаружение сублиминального визуального воздействия на человека средствами интеллектуального анализа данных электроэнцефалографических измерений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2015. № 1. С. 83–93.
6. Щеглова Е. С. К проблеме негативного влияния музыки на человеческий организм // Современные проблемы высшего образования. Творчество в дистанционном формате : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. С. М. Низамутдиновой. М., 2021. С. 195–199.
7. Сергеева М. С., Коровина Е. С., Колсанов А. В. [и др.]. Особенности динамики ритмов ЭЭГ человека при воздействии на сетчатку глаза голубым светом в спектре максимальной чувствительности фоторецепторов циркадианной системы // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. С. 132.
8. Михеев А. А. Вибрационная стимуляция мышц как метод интенсивного тренировочного воздействия на организм человека // Мир спорта. 2021. № 1. С. 77–91.
9. Беницкий С., Шомер Д. Л. Электроэнцефалография: основные биофизические и технологические аспекты для использования в клинике // *Epileptic Disorders*. 2020. Т. 22, № 6. С. 697–715.
10. Александров М. В. Истоки электроэнцефалографии (к 90-летию первой публикации работ Ганса Бергера) // Медицинский алфавит. 2019. Т. 2, № 12. С. 6–8.
11. Сахаров В. Л., Андреев А. С. Методы математической обработки электроэнцефалограмм. Таганрог : Антон, 2000. 44 с.
12. Левченко К. А. Исследование биосигналов психоэмоционального состояния человека // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы : сб. тр. XXXII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / под общ. ред. В. И. Жулева (18 марта – 5 апреля 2019 г.). Рязань, 2019. С. 108–113.
13. Агейкин А. В., Колесова Е. В., Тычков А. Ю. [и др.]. Анализ изменений ЭЭГ у больных с невротическими расстройствами // Психическое здоровье. 2018. Т. 16, № 5. С. 51–55.
14. Зенков Л. Р. Клиническая электроэнцефалография с элементами эпилептологии. М. : МЕДпресс-информ, 2004. 368 с.
15. Серик Л. В. Психокоррекционное оборудование – мощный и эффективный дополнительный метод в работе психологов УИС // Актуальные вопросы информатизации Федеральной службы исполнения наказаний на современном этапе развития уголовно-исполнительной системы : сб. материалов круглого стола. Тверь, 2018. С. 364–373.
16. Москвин В. А., Москвина Н. В. Метод аудиовизуальной стимуляции как способ психофизиологической подготовки спортсменов // Спортивный психолог. 2009. № 3. С. 54–59.
17. Мачихин В. А. Автоматизированное программируемое устройство для стимуляции испытуемого в целях выделения когнитивной реакции головного мозга и фрактальный анализ полученных данных ЭЭГ : дис. ... к-та техн. наук. Самара, 2019. 196 с.
18. Лабанов Д. Д. Об использовании метода комплексной аудиовизуальной стимуляции в программе коррекции личности осужденных // Ведомости уголовно-исполнительной системы. 2018. № 5. С. 68–71.

19. Тамбиев А. Э. Влияние аудиовизуальной стимуляции на эффективность обучения и умственную работоспособность // Валеология. 2014. № 4. С. 48–55.
20. Технический паспорт прибора майнд машина (Аудиовизуальный плеер) модель Nova Pro 100. М., 2015.
21. Тычков А. Ю., Агейкин А. В., Алимуратов А. К. [и др.]. Анализ и оценка сигнальных систем диагностики пограничных психических расстройств // Биотехносфера. 2017. № 1. С. 35–39.

### References

1. Patochkina N.A., Komel'kova M.V., Tseylikman O.B., Lapshin M.S. *Stress: psikhologicheskie, biokhimicheskie i psikhofiziologicheskie aspekty: ucheb. posobie = Stress: psychological, biochemical and psychophysiological aspects : textbook*. Chelyabinsk, 2017:82. (In Russ.)
2. Zenkov L.R., Ronkin M.A. *Funktional'naya diagnostika nervnykh bolezney = Functional diagnostics of nervous diseases*. Moscow: Meditsina, 1991:640. (In Russ.)
3. Efremova M.V. Analysis of methods for assessing the psychoemotional state of a person. *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii: sb. materialov zaochnykh nauch.-prakt. konf. = Physics and radioelectronics in medicine and ecology : collection of materials of correspondence scientific and practical conf.* Vladimir, 2020:105–109. (In Russ.)
4. Gavrya N.R., Vishnevetskiy V.Yu. A system for assessing the functional state of a person based on EEG. *Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie: sb. tr. KhVIII Vseros. nauch. konf. molodykh uchennykh, aspirantov i studentov: v 3 t. = Information technologies, system analysis and management : proceedings of the XVIII All-Russian Scientific Conference of young scientists, postgraduates and students : in 3 vols*. Rostov-na-Donu; Taganrog (ITSAU), 2020:168–171. (In Russ.)
5. Dyuk V.A., Kravchik M.R., Senkevich Yu.I. Detection of subliminal visual impact on a person by means of intellectual analysis of electroencephalographic measurement data. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya = Bulletin of St. Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Management processes*. 2015;(1):83–93. (In Russ.)
6. Shcheglova E.S. On the problem of the negative influence of music on the human body. *Sovremennye problemy vysshego obrazovaniya. Tvorchestvo v distantsionnom formate: materialy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modern problems of higher education. Creativity in a remote format : materials of the VI International scientific and practical conf.* Moscow, 2021:195–199. (In Russ.)
7. Sergeeva M.S., Korovina E.S., Kolsanov A.V. et al. Features of the dynamics of human EEG rhythms when exposed to the retina with blue light in the spectrum of maximum sensitivity of photoreceptors of the circadian system. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2015;(2-1):132. (In Russ.)
8. Mikheev A.A. Vibrational muscle stimulation as a method of intensive training effect on the human body. *Mir sporta = The world of sports*. 2021;(1):77–91. (In Russ.)
9. Beniczky S., Schomer D.L. Electroencephalography: basic biophysical and technological aspects for use in the clinic. *Epileptic Disorders*. 2020;22(6):697–715. (In Russ.)
10. Aleksandrov M.V. The origins of electroencephalography (to the 90th anniversary of the first publication of the works of Hans Berger). *Meditsinskiy alfavit = Medical Alphabet*. 2019;2(12):6–8. (In Russ.)
11. Sakharov V.L., Andreenko A.S. *Metody matematicheskoy obrabotki elektroentsefalogramm = Methods of mathematical processing of electroencephalograms*. Taganrog: Anton, 2000:44. (In Russ.)
12. Levchenko K.A. Investigation of biosignals of the psychoemotional state of a person. *Biotehnicheskie, meditsinskie i ekologicheskie sistemy, izmeritel'nye ustroystva i robototekhnicheskie komplekсы: sb. tr. XKhKhII Vseros. nauch.-tekhn. konf. studentov, molodykh uchennykh i spetsialistov = Biotechnical, medical and ecological systems, measuring devices and robotic complexes : proceedings of XXXIII All-Russian Scientific and Technical. conf. of students, young scientists and specialists*. Ryazan', 2019:108–113. (In Russ.)
13. Ageykin A.V., Kolesova E.V., Tyчков A.Yu. et al. Analysis of EEG changes in patients with neurotic disorders. *Psikhicheskoe zdorov'e = Mental health*. 2018;16(5):51–55. (In Russ.)
14. Zenkov L.R. *Klinicheskaya elektroentsefalografiya s elementami epileptologii = Clinical electroencephalography with elements of epileptology*. Moscow: MEDpress-inform, 2004:368. (In Russ.)
15. Serik L.V. Psychocorrection equipment – a powerful and effective additional method in the work of psychologists of the Criminal Justice System. *Aktual'nye voprosy informatizatsii Federal'noy sluzhby ispolneniya nakazaniy na sovremennom etape razvitiya ugolovno-ispolnitel'noy sistemy: sbornik materialov kruglogo stola = Actual issues of informatization of the Federal Penitentiary Service at the present stage of development of the penal system : collection of materials of the round table*. Tver', 2018:364–373. (In Russ.)
16. Moskvina V.A., Moskvina N.V. Method of audiovisual stimulation as a method of psychophysiological training of athletes. *Sportivnyy psikholog = Sports psychologist*. 2009;(3):54–59. (In Russ.)

17. Machikhin V.A. *Avtomatizirovannoe programmiruемое ustroystvo dlya stimulyatsii ispytuемого v tselyakh vydeleniya kognitivnoy reaktsii golovnoy mozga i fraktal'nyy analiz poluchennykh dannykh EEG = Automated programmable device for stimulating the subject in order to isolate the cognitive reaction of the brain and fractal analysis of the obtained EEG data.* PhD dissertation. Samara, 2019:196. (In Russ.)
18. Labanov D.D. On the use of the method of complex audiovisual stimulation in the program of correction of the personality of convicts. *Vedomosti ugovovno-ispolnitel'noy sistemy = Vedomosti of the penitentiary system.* 2018;(5):68–71. (In Russ.)
19. Tambiev A.E. The influence of audiovisual stimulation on the effectiveness of learning and mental performance. *Valeologiya = Valeologiya.* 2014;(4):48–55. (In Russ.)
20. *Tekhnicheskiy pasport pribora maynd mashina (Audiovizual'nyy pleer) model' Nova Rgo 100 = Technical passport of the device mind machine (Audio-visual player) model Nova Rgo 100.* Moscow, 2015. (In Russ.)
21. Tychkov A.Yu., Ageykin A.V., Alimuradov A.K. et al. Analysis and evaluation of signaling systems of diagnostics of borderline mental disorders. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere.* 2017;(1):35–39. (In Russ.)

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

##### **Софья Юрьевна Тверская**

студентка,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tverskaya\_sofya@mail.ru

##### **Sofya Yu. Tverskaya**

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

##### **Александр Юрьевич Тычков**

доктор технических наук,  
профессор кафедры 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,  
professor of the sub-department of radio  
engineering and radio electronic system,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

##### **Артём Павлович Назарычев**

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

##### **Artem P. Nazarychev**

Student,  
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 12.05.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 14.06.2022**

**Принята к публикации/Accepted 18.07.2022**



# КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

## CONTROL AND TESTING AIRCRAFT AND THEIR SYSTEMS

УДК 629.7.01:519.24

doi:10.21685/2307-5538-2022-3-15

### ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ

И. Г. Иванов<sup>1</sup>, С. В. Морозов<sup>2</sup>, М. Л. Белокопытов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Главный испытательный космический центр МО РФ имени Г. С. Титова, Краснознаменск, Россия

<sup>2</sup> 15-я армия Воздушно-космических сил особого назначения, Краснознаменск, Россия

<sup>3</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>igorivanov-90@yandex.ru, <sup>2</sup>serj090@yandex.ru, <sup>3</sup>hommer1990@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются процессы разработки, испытаний и применения по назначению существующих и перспективных космических средств. Предметом исследования являются способы повышения качества функционирования автоматизированных систем управления при проведении государственных испытаний образцов космических средств. Целью работы является разработка системы поддержки принятия решений, позволяющей автоматизировать процесс парирования нештатных (аварийных) ситуаций при проведении испытаний перспективных образцов космических средств. *Материалы и методы.* При разработке системы поддержки принятия решений основное внимание уделено формированию структурной схемы базы данных и возможности применения метода рассуждений на основе прецедентов. *Результаты.* Предложен подход к реализации системы поддержки принятия решений, использующий механизм рассуждений на основе прецедентов в системе экспертного диагностирования. Данный подход позволяет своевременно и более качественно осуществлять контроль технического состояния космических средств и дает возможность принимать адекватные решения с целью разрешения проблемных ситуаций. *Выводы.* Разработанная система поддержки принятия решений способствует уменьшению информационной нагрузки на должностное лицо в процессе принятия решений, снижению влияния факторов субъективности при анализе текущей ситуации, повышению оперативности принятия решения на этапе испытаний космических средств при контроле их технического состояния. Предложенный аппарат предлагается использовать для автоматизации процессов анализа испытаний и оперативного поиска разрешения нештатных и аварийных ситуаций при испытании перспективных космических средств.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, прецедент, космическое средство, испытания, база данных

**Для цитирования:** Иванов И. Г., Морозов С. В., Белокопытов М. Л. Повышение качества испытаний космических средств путем использования системы поддержки принятия решений на основе прецедентов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 121–130. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-15

### IMPROVING THE QUALITY OF TESTING OF SPACE ASSETS BY USING A DECISION SUPPORT SYSTEM BASED ON PRECEDENTS

I.G. Ivanov<sup>1</sup>, S.V. Morozov<sup>2</sup>, M.L. Belokopytov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Main Test Space Center named after G.S. Titov, Krasnoznamensk, Russia

<sup>2</sup> 15th Army of the Special Purpose Aerospace Forces, Krasnoznamensk, Russia

<sup>3</sup> Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>igorivanov-90@yandex.ru, <sup>2</sup>serj090@yandex.ru, <sup>3</sup>hommer1990@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The object of research is the processes of development, testing and intended use of existing and promising space assets. The subject of the study is ways to improve the quality of functioning of automated control systems during state tests of samples of space assets. The aim of the work is to develop a decision support system that allows automating the process of parrying emergency situations when testing promising samples of space assets. *Materials and methods.* When developing a decision support system, the main attention is paid to the formation of a structural scheme of the database and the possibility of using the method of reasoning based on precedents. *Results.* An approach to the implementation of a decision support system using a mechanism of reasoning based on precedents in the expert diagnostics system is proposed. This approach makes it possible to monitor the technical condition of space assets in a timely and more qualitative manner and makes it possible to make adequate decisions in order to resolve problematic situations. *Conclusions.* The developed decision support system helps to reduce the information burden on the official in the decision-making process, to reduce the influence of subjectivity factors in analyzing the current situation, to increase the efficiency of decision-making at the stage of testing space assets while monitoring their technical condition. The proposed device is proposed to be used to automate the processes of test analysis and operational search for the resolution of abnormal and emergency situations when testing promising space assets.

**Keywords:** decision support system, precedent, space vehicle, tests, database

**For citation:** Ivanov I.G., Morozov S.V., Belokopytov M.L. Improving the quality of testing of space assets by using a decision support system based on precedents. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):121–130. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-15

### Введение

В современных условиях сложной военно-политической обстановки и санкций возникает необходимость создания специальных средств, методов, моделей, информационных технологий, обеспечивающих высокое качество создаваемых образцов космических средств (КСр) на всех этапах жизненного цикла вооружения и военной техники.

Ситуация обостряется и с техническим усложнением и повышением наукоемкости КСр – бортовых специальных систем и комплексов, систем управления движением, систем терморегулирования, бортовых и наземных командно-измерительных систем, систем контроля, мониторинга и диагностики.

Существующие подходы к решению проблемы информационного сопровождения процессов испытаний КСр (как научно-теоретические так и применяемые на практике предприятиями военно-промышленного комплекса) решают большую часть задач области исследования, однако не предполагают их системной проработки и не дают обобщенных рекомендаций по интеграции современных средств автоматизации в единую автоматизированную информационную среду испытательной организации.

Существующие системы поддержки принятия решений (СППР) непосредственно связаны с актуальной в области искусственного интеллекта (ИИ) проблемой моделирования правдоподобных рассуждений, так называемых рассуждений «здорового смысла» [1, 2]. Использование рассуждений в СППР для мониторинга и управления такими сложными техническими объектами, как КСр, и процессами различной природы позволит осуществлять оперативный анализ проблемной ситуации и помочь лицам, принимающим решения (ЛПР), в качестве которых выступают эксплуатирующий персонал испытательной организации, члены главных оперативных групп управления, разработчики образцов КСр, находить адекватные и эффективные управляющие воздействия с целью разрешения нештатных и аварийных ситуаций. Задачи по оперативному руководству испытаниями и отработкой программ летных (государственных) испытаний КСр, контролю выполнения работ, организации взаимодействия эксплуатирующего персонала и представителей промышленности, анализу выполнения программы испытаний, разработке и выдаче рекомендаций по восстановлению функционирования образца КСр при возникновении аварийных и нештатных ситуаций требуют принятия оперативных решений на основе прецедентов для СППР. Подобные СППР смогли бы помочь автоматизировать процесс парирования нештатных (аварийных) ситуаций при проведении испытаний перспективных образцов КСр.

Летные испытания космических систем и комплексов (КС (КК)) как наиболее продолжительный и ответственный этап жизненного цикла могут задавать условия для интеграции финансовых, организационных и технических ресурсов в единую СППР на основе прецедентов, позволяющую оценивать техническое состояние КСр как на этапе испытаний, так и в процессе

их эксплуатации. На основании СППР оцениваются задаваемые технико-эксплуатационные характеристики образца КСр и формируются рекомендации по парированию нештатных и аварийных ситуаций.

### *Материалы и методы*

Оценка технического состояния КСр является приоритетной задачей, которая требует применения специализированных СППР. Существующие методы оценки технического состояния не охватывают всего спектра и характера внешних воздействий на КСр, а также конкретный тип нештатных и аварийных ситуаций, возникающих в процессе испытаний и эксплуатации образца КСр. Сложность решения данной задачи обусловлена слабой формализацией сведений об отказах, которые имеют описательный характер, отсутствием систематизированной информации о характере и изменениях внешних воздействующих факторов, большим количеством контролируемых параметров и взаимосвязей между ними, а также недостаточным количеством статистических данных, полученных в ходе испытаний вновь создаваемого образца КСр.

В связи с этим только специалисты, обладающие большим опытом работы в области проектирования, разработки, создания и испытаний КСр, могут обосновать принятие решения по конкретному отказу (возникновению нештатной или аварийной ситуации, выход контролируемого параметра к пограничным значениям допуска и за его пределы, возникновение «плавающей» неисправности), как правило, находя решение «по аналогии с предыдущим», т.е. адаптируя принятое ранее решение к текущей ситуации.

Следовательно, перспективным является решение задачи оценки технического состояния КСр путем создания СППР, имитирующей человеческие рассуждения и основанной на эффективном использовании существующего опыта, представленного в виде прецедентов [3]. Такая система позволит обобщать информацию, адаптироваться к ее изменениям, общаться с пользователем на понятном языке, принимать решение в условиях неполной (ненадежной, противоречивой) информации. Наличие механизма рассуждений на основе прецедентов в системе экспертного диагностирования позволит своевременно и более качественно осуществлять контроль технического состояния КСр, и даст возможность принимать адекватные решения с целью разрешения проблемной ситуации [4].

### *Результаты и обсуждение*

Работы по обеспечению непрерывной информационной поддержки изделия на всех этапах его жизненного цикла связывают с появлением концепции и идеологии CALS, а также с внедрением технологий, поддерживающих теоретические основы компьютеризированными и автоматизированными средствами.

Согласно ГОСТу<sup>1</sup>, CALS (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support) – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции, концепция и идеология информационной поддержки жизненного цикла продукции на всех его стадиях, основанная на использовании единого информационного пространства (интегрированной информационной среды), обеспечивающая единообразные способы информационного взаимодействия всех участников этого цикла: заказчиков продукции (включая государственные учреждения и ведомства), поставщиков (производителей) продукции, эксплуатационного и ремонтного персонала, реализованная посредством нормативных документов, регламентирующих правила указанного взаимодействия преимущественно посредством электронного обмена данными.

Совокупность научных достижений в области информационной поддержки жизненного цикла образца КСр можно представить в виде множества взаимодействующих и взаимодополняющих друг друга подсистем:

– подсистема нормативно-справочной информации (включает в себя технические регламенты, ГОСТы, ОСТы, НТД системы ОТТ, программы и методики испытаний и т.д., описывающие и регламентирующие правила представления данных о КСр, среде и процессах, средствах электронного обмена этими данными между участниками жизненного цикла);

<sup>1</sup> ГОСТ Р 50.1.032–2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Часть 2. Применение стандартов серии ГОСТ Р ИСО 10303.

- подсистема реализаций информационных технологий (представленных в виде готовых приложений (систем), обеспечивающих и реализующих выполнение концепций и идеологий на прикладном уровне;
- подсистема научных направлений, создающих теоретические и прикладные основы поддержки жизненного цикла изделия (включает управление конфигурацией, каталогизацию, CALS-концепцию);
- подсистема научных институтов и предприятий, проводящих исследования в области поддержки жизненного цикла.

Перечисленные подсистемы являются также источниками получения первичной (требующей обработки и представления в наглядной форме) информации.

В настоящее время средства автоматизации передачи информации и межмашинного обмена позволяют получать и передавать необходимые данные оперативно, точно и в наглядной форме. На рис. 1 приведена предлагаемая схема организации обмена данными между предприятиями-разработчиками и эксплуатирующей организацией на этапе испытаний КСр.

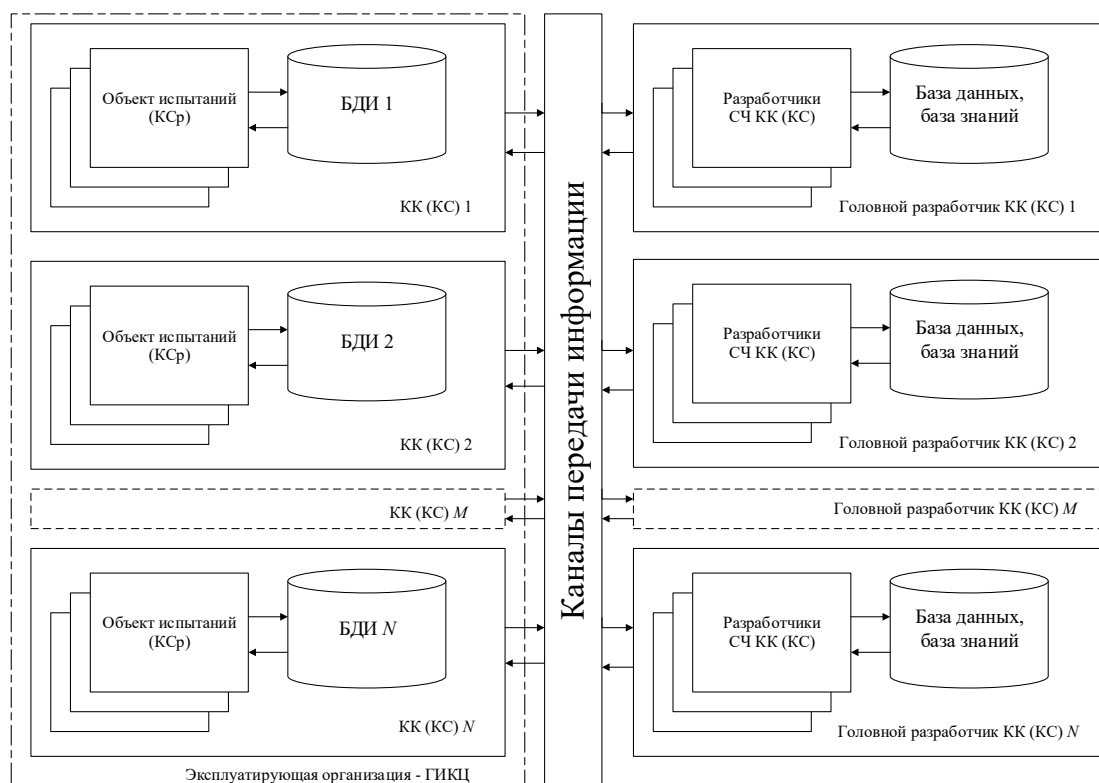


Рис. 1. Схема организации обмена данными на этапе испытаний КС (КК)

На рисунке под БДИ понимается база данных и информации, в которую входят: база данных о результатах испытаний КСр, база данных о результатах испытаний на этапах испытаний меньшего ранга (автономные, интеграционные, комплексные, межведомственные) и о результатах испытаний предшествующих КС (КК), база знаний и база прецедентов.

Модель рассуждений на основе прецедентов (Case-Based Reasoning, CBR) используется для представления знаний в системах различной принадлежности (социально-экономическая, военно-техническая, инженерная сферы). Под прецедентом в настоящей работе понимается описание проблемы или ситуации в совокупности с подробным указанием действий, предпринимаемых в данной ситуации или для решения данной проблемы [5]. Под моделью на основе прецедентов понимается модель принятия решений, в которой используются знания о предыдущих прецедентах. При рассмотрении новой проблемы отыскивается похожий прецедент в качестве аналога. Вместо того, чтобы искать решение каждый раз сначала, можно попытаться использовать решение, принятое в сходной ситуации, возможно, адаптировав его к изменившейся ситуации текущего случая. После того как текущий случай будет обработан, он вносится в базу прецедентов вместе со своим решением для его возможного последующего использования [6].

Метод рассуждений на основе прецедентов включает четыре этапа, формирующие так называемый *CBR*-цикл (рис. 2), или цикл *4R* (*Retrieve*, *Reuse*, *Revise*, *Retain*) [3]:

- извлечение (*retrieve*) наиболее адекватного (подобного) прецедента для сложившейся ситуации из базы знаний;
- повторное использование (*reuse*) извлеченного прецедента для попытки решения текущей проблемы;
- пересмотр и адаптация (*revise*) в случае необходимости полученного решения в соответствии с текущей проблемой;
- сохранение (*retain*) вновь принятого решения как части нового прецедента.

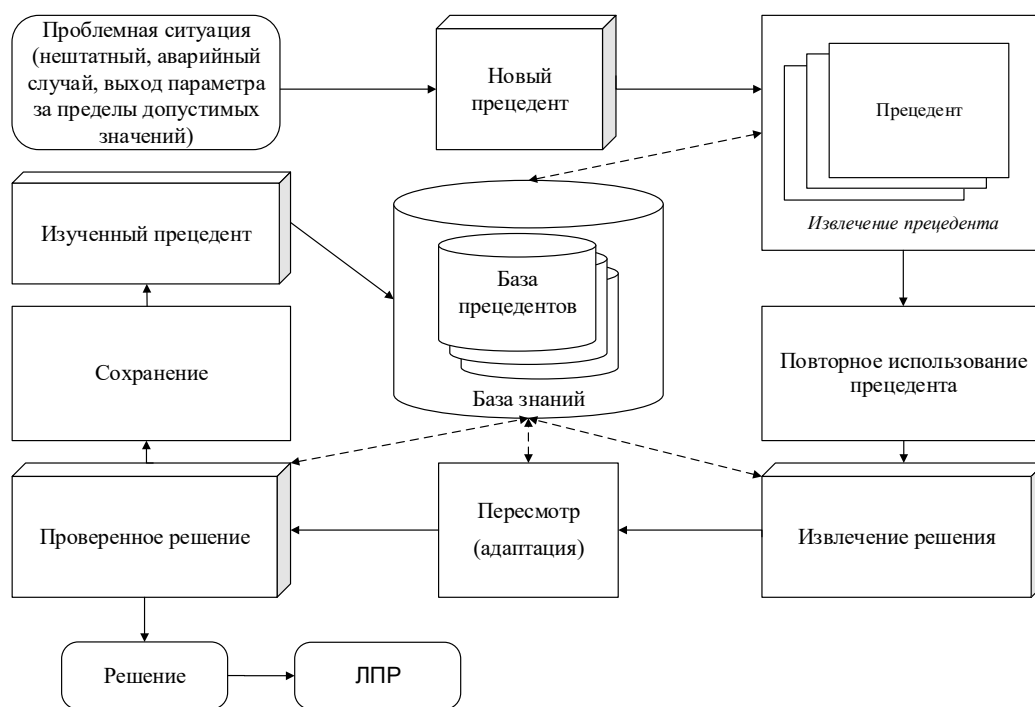


Рис. 2. Структура *CBR*-цикла в СППР при испытании КСр

На основе анализа *CBR* подхода предлагается алгоритм работы СППР по поиску решения при возникновении проблемной (нештатной, аварийной) ситуации на этапе испытаний КСр:

- 1) идентификация проблемной ситуации;
- 2) поиск в базе прецедентов подходящего прецедента;
- 3) выполнение набора операций на тестовой базе (имитаторе работы аппаратуры);
- 4) оценка результата;
- 5) доработка и сохранение нового прецедента в базу прецедентов.

Информация о новой проблемной ситуации используется для извлечения из базы прецедентов наиболее подходящего (подходящих) прецедента (прецедентов). Извлеченный прецедент используется повторно для получения решения новой проблемы (задачи). Затем предложенное решение в случае необходимости может быть адаптировано к особенностям новой ситуации и применено на практике. В случае успешного применения проверенное решение совместно с описанием проблемной ситуации образует новый прецедент, который сохраняется в базе прецедентов. Таким образом, системой накапливается опыт (прецеденты) и реализуется машинное обучение.

В *CBR*-цикле может использоваться не только база прецедентов, но и обобщенные знания о предметной области для поддержки процесса рассуждения на основе прецедентов. Эта поддержка может быть слабой или сильной, а может и отсутствовать полностью.

Как правило, в *CBR*-цикле на различных этапах требуется привлечение ЛПР. Если процесс извлечения прецедентов может выполняться автоматически, то для процесса адаптации и повторного использования прецедентов может потребоваться участие ЛПР.

Проблема представления прецедента – это, прежде всего, проблема выбора информации, которую надо включать в описание прецедентов, нахождение соответствующей структуры для описания его содержания, а также определения, каким образом должна быть организована база знаний прецедентов для эффективного поиска и многократного использования.

Первоначальное описание прецедента может быть представлено в виде

$$\text{Pr aecedens} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, k), \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – значения атрибутов прецедента, идентифицирующих ситуацию, в качестве которых могут выступать числовые признаки – веса ключевых слов, определяющих связи прецедента с понятиями предметной области, а также дополнительные параметры из описания прецедента, имеющие в основном качественный тип (средство, предполагаемая причина, узел, значения параметра, затраченные материальные и временные ресурсы, пределы допустимых значений и т.п.);  $k$  – решение проблемы, определенное в прецеденте;  $K$  – класс семантически близких прецедентов из множества  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_d\}$ .

В последующем, по мере углубления в проблемную область, возможно усложнение структуры прецедента, введение иерархических и других отношений между признаками. Например, для формирования структуры базы прецедентов возможно провести кластеризацию прецедентов по признакам: нештатная ситуация, аварийная ситуация, выход параметра за пределы допустимых значений, проблемная ситуация возникла в обеспечивающей аппаратуре или в специальной (целевой) и т.п. Для формирования кластера прецедентов необходимо сформировать экспертную группу.

Анализ условий создания и испытаний КСр показал, что в качестве экспертов для формирования кластера прецедентов следует привлекать группы экспертов по четырем направлениям:

- группа заказчика – включает представителей органов военного управления, Департамента МО РФ по обеспечению государственного оборонного заказа, головного центрального научно-исследовательского института МО РФ;
- группа разработчиков КС (КК) – включает главного конструктора, конструкторов по направлениям работы, ведущих специалистов, инженеров;
- группа разработчиков средств наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) – включает специалистов организаций-разработчиков средств НАКУ;
- группа испытывающей и эксплуатирующей организации – включает специалистов в области испытаний и эксплуатации средств НАКУ и составных частей КС (КК).

Для каждой из вышеперечисленных групп экспертов устанавливается весовой коэффициент. Значения коэффициентов основаны на обобщении работ отечественных и зарубежных авторов по оценке профессиональной ориентации экспертов в теоретическом анализе проблемы и производственном опыте. Кроме того, о значимости каждой из групп экспертов можно судить на основании анализа затрат на устранение ошибок, возникающих на каждой из стадий жизненного цикла технического средства. Установлено, что исправление ошибки, допущенной конструктором изделия на этапе конструирования, стоит 1 р., на этапе проектирования – 10 р., а в производстве – 100 р. [7]. Следовательно, наибольшие оценки значимости мнений экспертов были присвоены группам разработчиков КС (КК) и заказчиков, получившим оценки 4 и 3 соответственно, мнение групп разработчиков средств НАКУ и эксплуатирующей организации – по 2 балла.

Весовые коэффициенты групп экспертов, рассчитанные как отношение каждой оценки к их сумме, составляют:

- группа заказчика ( $g_1$ ) – 0,27;
- группа разработчиков КС (КК) ( $g_2$ ) – 0,37;
- группа разработчиков средств НАКУ ( $g_3$ ) – 0,18;
- группа испытывающей и эксплуатирующей организации ( $g_4$ ) – 0,18.

Прецедент (1) является описанием текущего технического состояния КСр в совокупности с указанием работ, которые проводятся в результате испытаний и включает следующие основные компоненты (рис. 3): технико-эксплуатационные параметры КСр, причины проблемной ситуации, рекомендации по применению решения и т.д.



Рис. 3. Структура прецедента в базе прецедентов СППР в процессе испытаний КСр

База прецедентов СППР содержит информацию о каждом техническом параметре, который используется для описания прецедентов. Структура базы прецедентов СППР в процессе испытаний КСр представлена на рис. 4.



Рис. 4. Структура базы данных прецедентов СППР в процессе испытаний КСр

После того, как отобран соответствующий прецедент, может выполняться его адаптация – модификация имеющегося в нем решения с целью его соответствия параметрам текущей ситуации и сохранения в базе прецедентов. В случае отсутствия необходимости в адаптации выполняется сохранение выбранного прецедента без изменения параметров.

Концептуальную модель автоматизированной системы управления в процессе испытаний КСр на основе прецедентов можно представить в виде совокупности блоков, изображенных на рис. 5.

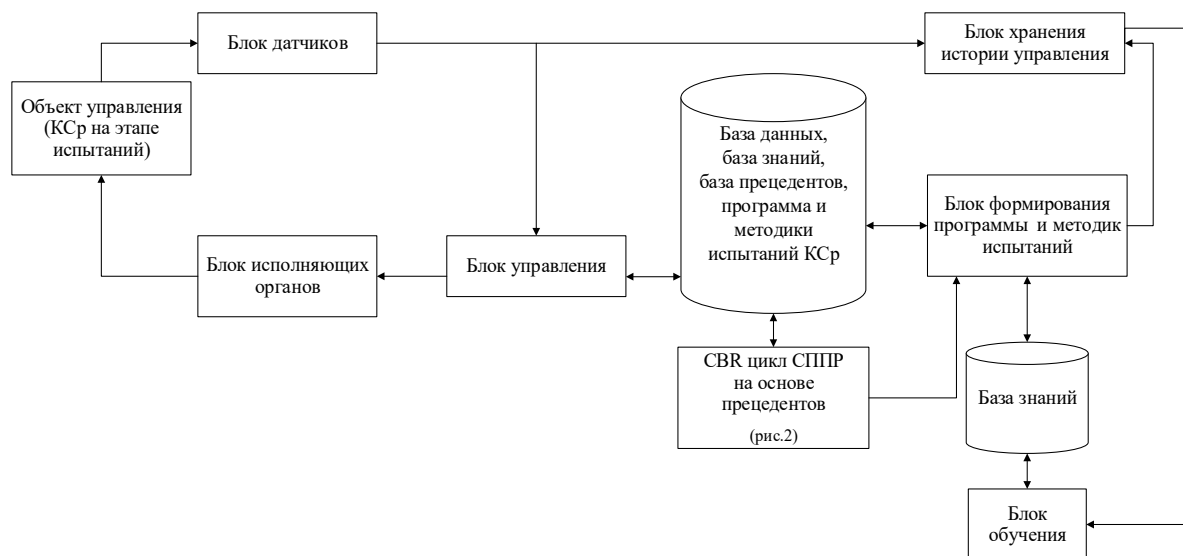


Рис. 5. Структурная схема концептуальной модели автоматизированной системы управления в процессе испытаний КСр на основе прецедентов

В блоке «*CBR*-цикл СППР на основе прецедентов» происходит извлечение прецедентов и формируются рекомендации ЛППР по результатам возникновения проблемной ситуации. Последовательности изменения интересующих параметров от времени записываются в блок «база данных и прецедентов». В этой многоуровневой базе данных происходит последовательное преобразование входных образов в управляющие воздействия посредством блока «формирования программы и методик испытаний». Выходные величины формируются в блоке «база знаний». В результате формируется последовательность управляющих параметров, которая сохраняется в «базе данных и прецедентов». На основе полученных данных «блок управления» производит непосредственное проведение испытаний. В процессе проведения испытаний с помощью «блока датчиков» получаем информацию о текущих (контролируемых) параметрах образца КСр. Все эти данные сохраняются в блоке «хранения информации». «Блок обучения» может управлять «блоком управления» и получать информацию с датчиков в режиме обратной связи. Это необходимо для того, чтобы заполнить базу знаний, на основе которой формируются управляющие правила. Эти правила также могут создаваться или корректироваться на основе информации, которая поступает с «блока хранения истории управления» на блок обучения.

Во время проведения испытаний в автоматизированной системе управления в процессе испытаний КСр используется обратная связь. Она применяется не только для фиксации результатов, но и для заполнения базы знаний с помощью метода прецедентов.

Основными функциональными компонентами автоматизированной системы управления в процессе испытаний КСр на основе прецедентов становятся:

- получение значений контролируемых параметров (характеристик) КСр от эксплуатирующего персонала, системы контроллеров, из базы данных;
- анализ технического состояния КСр, предназначенный для предварительной обработки информации при возникновении проблемной ситуации;
- настройка базы прецедентов, позволяющая эксперту формировать структуру базы прецедентов, загрузку и сохранение и т.д.;



- создание, накопление, корректировка библиотек прецедентов, которые уже имели место при проведении испытаний КСр или заданы экспертом на основе его собственного опыта;
- поиск решения, который реализует поиск прецедентов;
- вывод результатов, который отображает «предварительный диагноз» и рекомендации ЛПР и/или эксперту.

### *Заключение*

В ходе проведенного исследования было установлено, что поддержка принятия решений при проведении государственных испытаний образцов КСр на основе прецедентов позволяет решать слабо форматизированные задачи контроля и оценки технического состояния КСр, упростить получение знаний от экспертов, сократить время поиска решения и реализовать алгоритм работы автоматизированной системы управления в процессе испытаний КСр на основе прецедентов.

Предложена структурная схема концептуальной модели автоматизированной системы управления в процессе испытаний космических средств на основе прецедентов, которая благодаря наличию механизма рассуждений на основе прецедентов в системе экспертного диагностирования позволит своевременно и более качественно осуществлять контроль технического состояния КСр и даст возможность принимать адекватные решения с целью разрешения проблемных ситуаций. Применение СППР будет способствовать уменьшению информационной нагрузки на ЛПР в процессе принятия решений, снижению влияния факторов субъективности при анализе текущей ситуации, повышению оперативности принятия решения на этапе испытаний КСр при контроле технического состояния КСр.

Предложенный аппарат предлагается использовать для автоматизации процессов анализа испытаний и оперативного поиска разрешения нештатных и аварийных ситуаций при испытаниях КСр.

### *Список литературы*

1. Поспелов Д. А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. М. : Радио и связь, 1989. 184 с.
2. Вагин В. Н., Головина Е. Ю., Загорянская А. А. [и др.]. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / под ред. В. Н. Вагина, Д. А. Поспелова. 2-е изд. М. : Физматлит, 2008. 712 с.
3. Aamodt A., Plaza E. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches // *AI Communications*. 1994. Vol. 7, iss. 1. P. 39–59.
4. Варшавский П. Р., Еремеев А. П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2009. № 1. С. 45–57.
5. Юдин В. Н., Карпов Л. Е., Ватазин А. В. Методы интеллектуального анализа данных и вывода по прецедентам в программной системе поддержки врачебных решений // *Альманах клинической медицины*. 2008. Т. 17, ч. 1. С. 266–269.
6. Bonzano A., Cunningham P., Smyth B. Using introspective learning to improve retrieval in CBR: A case study in air traffic control, ICCBR'97. Rhode Island, USA, 1997.
7. Соболев Ю. М. Конструктор и экономика: ФСА для конструктора. Пермь, 1987. 102 с.
8. Берман А. Ф., Николайчук О. А., Павлов А. И. [и др.]. Использование прецедентов для обоснования мероприятий по предотвращению отказов механических систем // *Труды 11-й национальной конференции по ИИ с международным участием (КИИ-2008, г. Дубна, Россия)* : в 3 т. М., 2008. Т. 2. С. 106–113.
9. Иванов И. Г. Обоснование экспертного метода оценки характеристик объекта космической системы (комплекса) // *Всероссийский форум научной молодежи «Богатство России»* : сб. докл. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. С. 7–8.

### *References*

1. Pospelov D.A. *Modelirovanie rassuzhdeniy. Opyt analiza myslitel'nykh aktov = Modeling of reasoning. The experience of analyzing mental acts*. Moscow: Radio i svyaz', 1989:184. (In Russ.)
2. Vagin V.N., Golovina E.Yu., Zagoryanskaya A.A. et al. *Dostovernyy i pravdopodobnyy vyvod v intellektual'nykh sistemakh. 2-e izd. = Reliable and plausible conclusion in intelligent systems. 2nd ed.* Moscow: Fizmatlit, 2008:712. (In Russ.)

3. Aamodt A., Plaza E. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI Communications*. 1994;7(1):39–59.
4. Varshavskiy P.R., Ereemeev A.P. Modeling of reasoning based on precedents in intelligent decision support systems. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy = Artificial intelligence and decision-making*. 2009;(1):45–57. (In Russ.)
5. Yudin V.N., Karpov L.E., Vatazin A.V. Methods of data mining and inference according to precedents in the software system for supporting medical decisions. *Al'manakh klinicheskoy meditsiny = Almanac of clinical Medicine*. 2008;17(1):266–269. (In Russ.)
6. Bonzano A., Cunningham P., Smyth B. *Using introspective learning to improve retrieval in CBR: A case study in air traffic control, ICCBR'97*. Rhode Island, USA, 1997.
7. Sobolev Yu.M. *Konstruktor i ekonomika: FSA dlya konstruktora = Constructor and economy: FSA for the constructor*. Perm', 1987:102. (In Russ.)
8. Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I. et al. The use of precedents to justify measures to prevent failures of mechanical systems. *Trudy 11-y natsional'noy konferentsii po II s mezhdunarodnym uchastiem (KII-2008, g. Dubna, Rossiya): v 3 t. = Proceedings of the 11th National Conference on AI with international participation (KII-2008, Dubna, Russia): in 3 volumes*. Moscow, 2008;2:106–113. (In Russ.)
9. Ivanov I.G. Substantiation of an expert method for assessing the characteristics of an object of a space system (complex). *Vserossiyskiy forum nauchnoy molodezhi «Bogatstvo Rossii»: sb. dokl. = All-Russian Forum of scientific Youth "Wealth of Russia" : collection of reports*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2018:7–8. (In Russ.)

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

##### **Игорь Геннадьевич Иванов**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
научно-испытательного отдела,  
Главный испытательный космический центр  
МО РФ имени Г. С. Титова  
(Россия, Московская обл.,  
г. Краснознаменск, в/ч 32103)  
E-mail: igorivanov-90@yandex.ru

##### **Igor' G. Ivanov**

Candidate of technical sciences,  
senior researcher of the research  
and testing department,  
Main Test Space Center named after G.S. Titov  
(32102 military unit, Krasnoznamensk,  
Moscow region, Russia)

##### **Сергей Викторович Морозов**

старший офицер отдела,  
15-я армия Воздушно-космических сил  
особого назначения  
(Россия, Московская обл.,  
г. Краснознаменск, в/ч 53035)  
E-mail: serj090@yandex.ru

##### **Sergey V. Morozov**

Senior officer of the department,  
15th Army of the Special Purpose Aerospace Forces  
(53035 military unit, Krasnoznamensk,  
Moscow region, Russia)

##### **Марк Львович Белокопытов**

кандидат технических наук,  
начальник научно-исследовательской  
лаборатории,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: hommer1990@mail.ru

##### **Mark L. Belokopytov**

Candidate of technical sciences,  
head of the research laboratory,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

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

**Поступила в редакцию / Received 28.04.2022**

**Поступила после рецензирования / Revised 30.05.2022**

**Принята к публикации / Accepted 29.06.2022**