

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

*Пономарев В. Н., Трофимов А. А., Бастрыгин К. И.,
Смирнов И. Е., Марков Д. М.*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДАТЧИКА РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЯ

7

Ишков А. С.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ
ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

16

Григорьев А. В.

ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
ОБЩЕГО УРОВНЯ ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ

24

Ильин А. С., Рыбаков И. М., Лысенко А. В., Юрков Н. К.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ ПОВЕРКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

31

Листюхин В. А., Печерская Е. А.

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

37

Безбородова О. Е.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА

43

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Восканян А. А., Кострикина И. А.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ПО ПОВЕРКЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

51

Печерская Е. А., Тузова Д. Е., Голубков П. Е.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ
АНАЛИЗ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

58

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Семенов А. Д., Волков С. В., Исаев С. Г., Ларкин С. Е., Чапаев В. С.

КОСВЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ
РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

64

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Тверская С. Ю., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Горбунов В. Н.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА КОМПЛЕКСНОЙ
ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
У ЛЮДЕЙ С ЭМОЦИОНАЛЬНЫМИ РАССТРОЙСТВАМИ

71

Алимурадов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Дудников Д. С.

НОВЫЙ ПОДХОД СЕГМЕНТАЦИИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ
НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА

80

Крамм М. Н., Бодин О. Н., Бодин А. Ю.,

Жихарева Г. В., Чыонг Тхи Лан Нхи

РЕКОНСТРУКЦИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
АКТИВНОСТИ СЕРДЦА С ПОМОЩЬЮ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

93

Овчинников Д. А., Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Сашина А. Д.

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА «УМНОЙ» ОДЕЖДЫ
С ДИСТАНЦИОННЫМ КОНТРОЛЕМ
И УПРАВЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОСРЕДСТВОМ
МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ИСПОЛНЕНИЯ

102

Бодин О. Н., Едемский М. В., Кручинина Н. Э., Сержантова Н. А.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

110

Шерстнев В. В.

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ МЕДИЦИНСКАЯ
СИСТЕМА УДАЛЕННОЙ КОРРЕКЦИИ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ
ПОСТРАДАВШЕГО В ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

119

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

Лоскутов А. И., Шиян А. Н., Клыков В. А., Неупокоев С. А.

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕСТОВ БОРТОВОЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ АВТОНОМНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ СИТУАЦИОННЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПОДСИСТЕМ

128

**Гладков А. В., Бастрыгин К. И., Пономарев В. Н., Трофимов А. А.,
Здобнов С. А.** КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО
УРОВНЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ
ТЕХНИКИ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ

139

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 4, 2022

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

<i>Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Bastrygin K.I., Smirnov I.E., Markov D.M.</i> SIMULATION OF THE PRESSURE DIFFERENCE SENSOR	7
<i>Ishkov A.S.</i> DECISION SUPPORT SYSTEM FOR EVALUATION RELIABILITY INDICATORS OF ELECTRONIC PRODUCTS	16
<i>Grigoriev A.V.</i> EVALUATION OF THE METHODOLOGICAL ERRORS OF MEASURING THE GENERAL VIBRATION LEVEL BASED ON THE IMAGE BLUR ANALYSIS OF A ROUND BAR	24
<i>Ilin A.S., Rybakov I.M., Lysenko A.V., Yurkov N.K.</i> THE PRESENT STATE OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEMS FOR CHECKING HIGH VOLTAGE CONVERTERS	31
<i>Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A.</i> DEVELOPMENT OF INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR INVESTIGATION OF OPERATING MODES OF OVERHEAD POWER LINES	37
<i>Bezborodova O.E.</i> ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF FORECASTING THE STATE OF THE TERRITORIAL TECHNOSPHERE IN THE INFORMATION-MEASURING AND MANAGEMENT SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL WELFARE OF HUMANS	43

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Voskanyan A.A., Kostrikina I.A.

METHODOLOGY FOR ASSESSING RISKS
IN VERIFICATION OF MEASURING INSTRUMENTS

51

Pecherskaya E.A., Tuzova D.E., Golubkov P.E.

FUNCTIONAL AND METROLOGICAL ANALYSIS OF MEASURING
CHANNELS OF MAGNETIC MATERIALS PARAMETERS

58

ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

Semenov A.D., Volkov S.V., Isaev S.G., Larkin S.E., Chapaev V.S.

INDIRECT MEASUREMENT OF THE ROTOR SPEED
OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

64

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Tverskaya S.Yu., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Gorbunov V.N.

DEVELOPMENT AND STUDY OF AN ALGORITHM FOR COMPLEX
PROCESSING OF ELECTROENCEPHALOGRAPHIC SIGNALS IN
PEOPLE WITH EMOTIONAL DISORDERS

71

Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Dudnikov D.S.

NOVEL APPROACH BASED ON TIME-FREQUENCY ANALYSIS
FOR SEGMENTATION OF SPEECH SIGNALS

80

Kramm M.N., Bodin O.N., Bodin A.Yu.,

Zhikhareva G.V., Truong Thi Lan Nhi

RECONSTRUCTION AND VISUALIZATION OF THE HEART
ELECTRICAL ACTIVITY USING A MULTIELECTRODE
SYSTEM FOR ELECTROCARDIAGNOSTICS

93

Ovchinnikov D.L., Tychkov A.Yu., Chernyshov D.S., Sashina A.D.

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF "SMART" CLOTHING
WITH REMOTE CONTROL AND TEMPERATURE CONTROL
BY MEANS OF MICROELECTRONIC DESIGN

102

Bodin O.N., Edemskiy M.V., Kruchinina N.E., Serzhantova N.A.

FEATURES OF THE FUNCTIONING OF THE MEDICAL
INFORMATION SYSTEM IN THE CONDITIONS
OF EMERGENCY SITUATION

110

Sherstnev V.V.

INFORMATION AND CONTROL MEDICAL SYSTEM
FOR REMOTE CORRECTION OF THE HEALTH STATUS
OF THE VICTIM IN AN EMERGENCY SITUATION

119

**CONTROL AND TESTING
AIRCRAFT AND THEIR SYSTEMS**

Loskutov A.I., Shiyan A.N., Klykov V.A., Neupokoev S.A.

ALGORITHM FOR SYNTHESIS OF OPTIMAL TESTS OF ONBOARD
RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT OF AUTONOMOUS SPACE
VEHICLES BASED ON SITUATIONAL INTERACTIONS
OF SUBSYSTEMS

128

Gladkov A.V., Bastrygin K.I., Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Zdobnov S.A.

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE TECHNICAL LEVEL OF
SENSORS FOR ROCKET AND SPACE ENGINEERING SYSTEMS
DURING THE DEVELOPMENT STAGE

139

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.586.2

doi:10.21685/2307-5538-2022-4-1

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЯ

В. Н. Пономарев¹, А. А. Трофимов², К. И. Бастрыгин³, И. Е. Смирнов⁴, Д. М. Марков⁵

^{1,3} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

^{2,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ revik2296@gmail.com, ² alex.t1978@mail.ru, ³ sensor@niifi.ru, ^{4,5} iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Характерной чертой мирового развития информационных и управляющих систем конца XX – начала XXI в. является все более широкое применение во всех сферах жизнедеятельности датчиков давления. Датчики применяются в промышленных отраслях, в автоматизации производственных процессов, в автомобильном, авиационном и железнодорожном транспорте, ракетно-космической и авиационной технике. В связи со сложностью и трудоемкостью технологического процесса изготовления датчиков давления особую роль в процессе их проектирования приобретают методы имитационного моделирования, применение которых позволяет существенно сократить сроки и затраты на разработку датчиков давления. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый датчик заменяется его моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этом объекте. В эксперименте применялось специализированное программное обеспечение Solidworks, позволяющее избежать дорогостоящих и длительных циклов «проектирование–изготовление–испытания». *Результаты.* В результате моделирования мембраны датчика для повышения ее чувствительности к перепадам давления были определены толщина мембраны и диапазон прогиба мембраны. А также выявлена зависимость значения прогиба от толщины мембраны.

Ключевые слова: имитационное моделирование, тензорезисторный датчик, давление, прогиб мембраны, внешние воздействующие факторы

Для цитирования: Пономарев В. Н., Трофимов А. А., Бастрыгин К. И., Смирнов И. Е., Марков Д. М. Имитационное моделирование датчика разности давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 7–15. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-1

SIMULATION OF THE PRESSURE DIFFERENCE SENSOR

V.N. Ponomarev¹, A.A. Trofimov², K.I. Bastrygin³, I.E. Smirnov⁴, D.M. Markov⁵

^{1,3} Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

^{2,4,5} Penza State University, Penza, Russia

¹ revik2296@gmail.com, ² alex.t1978@mail.ru, ³ sensor@niifi.ru, ^{4,5} iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* A characteristic feature of the global development of information and control systems in the late XX – early XXI century is the increasingly widespread use of pressure sensors in all spheres of life. Sensors are used in industrial branches, in automation of production processes, in automobile, aviation and railway transport, rocket-space and aviation engineering. Due to the complexity and labor intensity of the technological process of pressure sensors, a special role in the process of their design methods of simulation, the use of which can significantly reduce the time and cost of developing pressure sensors. *Materials and methods.* As a method of research, simulation modeling was used, in which the sensor under study is replaced by its model, with which experiments are conducted in order to obtain information about the object. The specialized software Solidworks was used in the experiment to avoid expensive and

time-consuming cycles of design-build-testing. *Results.* As a result of modeling the sensor membrane to increase its sensitivity to pressure drop, the membrane thickness and the diaphragm deflection range were determined. And also the dependence of the deflection value on the thickness of the membrane was determined.

Keywords: simulation modeling, strain gauge, pressure, membrane deflection, external influencing factors

For citation: Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Bastrygin K.I., Smirnov I.E., Markov D.M. Simulation of the pressure difference sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):7–15. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-1

Введение

В информационно-измерительных и управляющих системах, используемых при испытаниях и эксплуатации изделий авиационной и космической техники, в ряду измеряемых физических параметров доля параметра «давление» занимает 40–60 % от их общего числа. По этой причине задача проектирования новых или модернизации существующих датчиков давления встречается достаточно часто [1, 2].

Необходимость проведения больших объемов математических расчетов, разработки схемы электрической принципиальной, расчета вариантов исполнения конструкции чувствительных элементов для заданных условий эксплуатации подразумевает привлечение MCAD, ECAD систем [3, 4].

Задачу проектирования в заданных условиях можно решить двумя способами. Первый – используя стандартные средства САПР, разработать макет датчика давления с необходимым первичным преобразователем, провести испытания и обработать полученные результаты. Достоинства данного способа: достоверный результат с требуемой точностью. Недостатки: дороговизна, требуется наличие сложного оборудования, длительное время разработки макета и проведения испытаний. Второй способ – имитационное моделирование. В этом случае можно сократить время на проектирование за счет свободного выбора параметров моделирования и уменьшить временные затраты на проведение испытаний. Недостатки: модель разрабатывается с определенными допущениями, необходимость подтверждения адекватности разрабатываемой модели, точность результатов математического моделирования определяется степенью проработанности модели.

Основная часть

Задачей моделирования является количественная и качественная оценка поведения мембраны датчика разности давления, имеющего диапазон измерения 0–0,3 кгс/см (0–0,03 МПа). Задача сводится к определению значения прогиба мембраны под действием номинального давления (P_n), а также нахождения значения толщины мембраны.

При моделировании датчика было принято значение температуры окружающей среды +25 °С. В соответствии с формулировкой задачи выбран статический тип расчета без учета внешних сторонних сил. Номинальное давление $P_n = 0,03$ МПа.

Схема нагружения номинальным давлением (P_n) соответствует реальным условиям работы датчика на объекте эксплуатации. Давление на мембрану подается как в прямом (P_1), так и в обратном направлении (P_2). Номинальное давление $P_n = P_1 = P_2$. Жесткая фиксация наложена в местах сварки. На рис. 1 приведен внешний вид датчика.

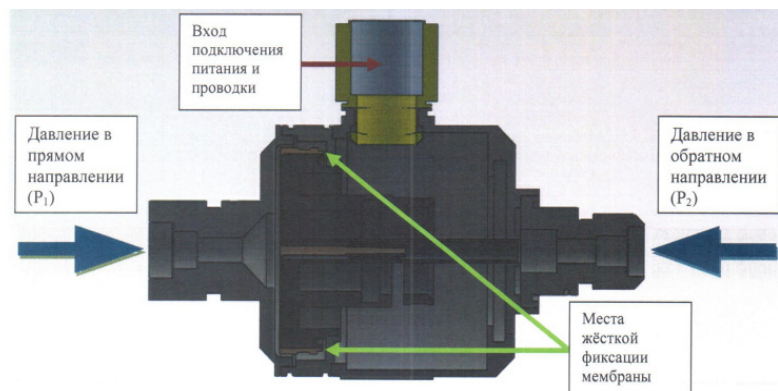


Рис. 1. Внешний вид датчика

Схемы нагружения номинальным давлением и жесткая фиксация мембраны представлены на рис. 2, 3.

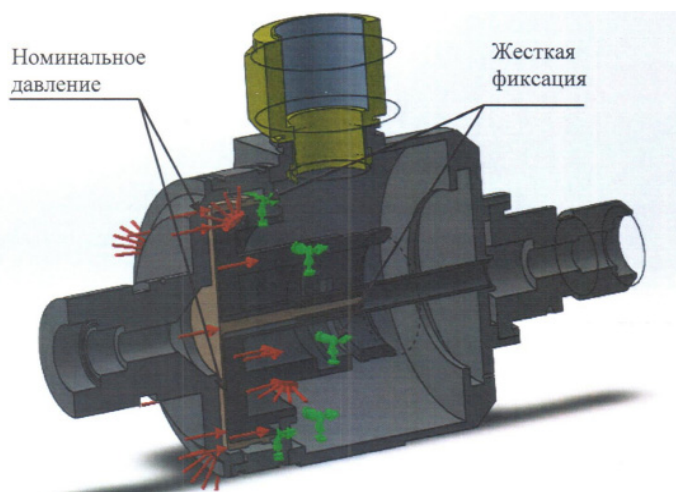


Рис. 2. Схема нагружения и жесткой фиксации мембраны в прямом направлении

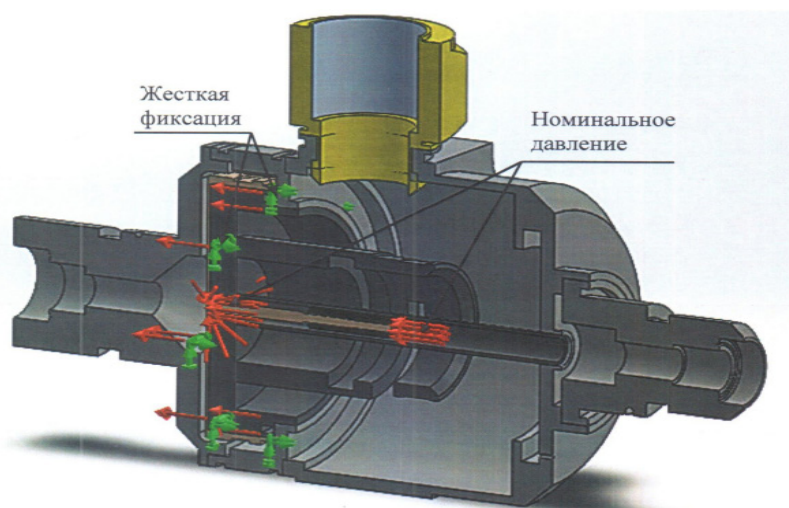


Рис. 3. Схема нагружения и жесткой фиксации мембраны в обратном направлении

В табл. 1 приведены физико-механические свойства используемого материала, необходимого для проведения анализа в модуле Simulation.

Таблица 1

Физико-механические свойства материала 36НХТЮ ГОСТ 14119-85

Марка материала	36НХТЮ ГОСТ 14119-85
Тип материала	Линейный – упругий – изотропный
Критерий прочности	Максимальное напряжение по Мизесу
Предел текучести	$7,5 \cdot 10^8$ Па
Предел прочности	$3 \cdot 10^7$ Па
Модуль упругости	$1,8 \cdot 10^{11}$ Па
Коэффициент Пуассона	0,28
Массовая плотность	7800 кг/м^3
Коэффициент теплового расширения	$1,25 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$

Сетка конечных элементов строится исходя из параметров геометрической формы модели и ее размеров. Внешний вид сетки конечных элементов изображен на рис. 4. Основные характеристики сетки конечных элементов приведены в табл. 2.

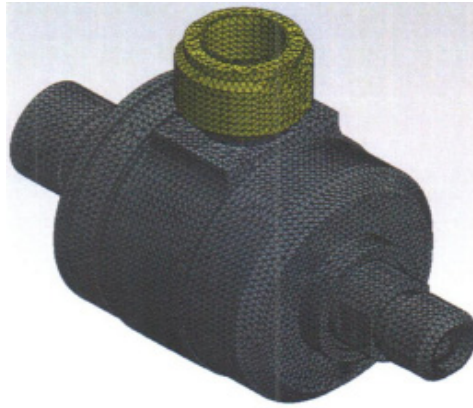


Рис. 4. Разбиение модели на конечные элементы

Таблица 2

Основные характеристики сетки конечных элементов

Используемое разбиение	Сетка на основе кривизны
Максимальный размер элемента	1,14085 мм
Качество сетки	Высокое
Всего узлов	281384
Всего элементов	171533
Максимальное соотношение сторон	48,74

Результаты исследования

Результаты исследования по определению значения прогиба мембраны, толщиной $h = 0,26$, представлены на рис. 5.

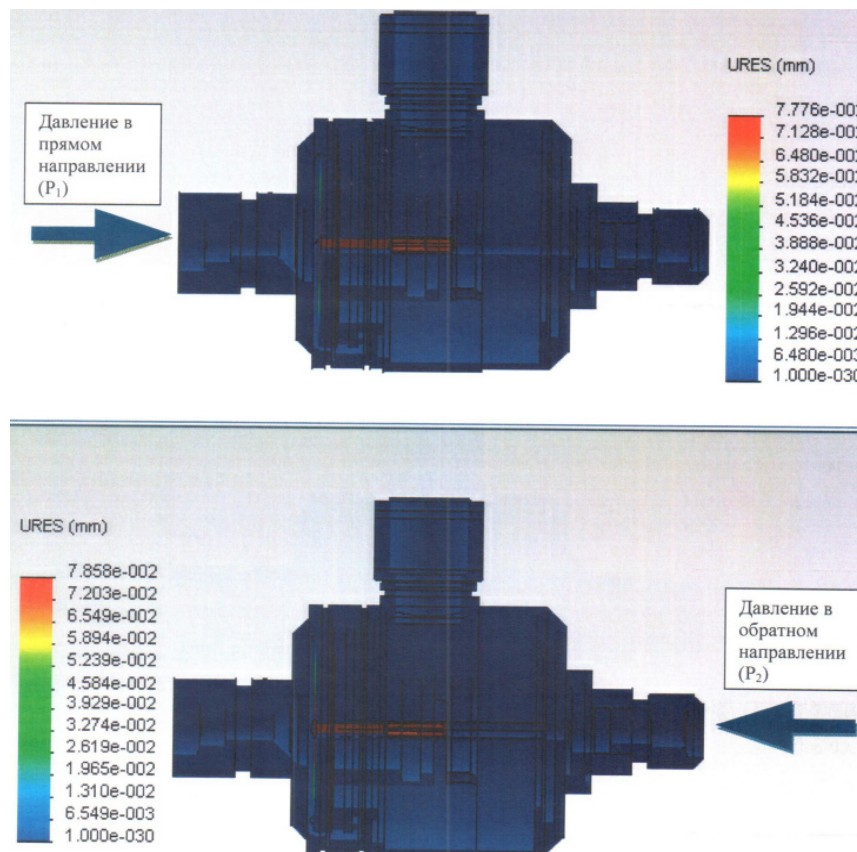


Рис. 5. Эпюра перемещения мембраны датчика в прямом и обратном направлении

Выявлено, что при давлении $P_n = 0,03\text{МПа}$, подаваемом в приемные полости, прогиб мембраны составил $77,6\text{ мкм}$ в прямом направлении и $78,5\text{ мкм}$ в обратном направлении. По картине распределения перемещений на плоскости мембраны (рис. 6) видно, что прогиб мембраны равномерный, без видимых перепадов и резких скачков, возникающие перемещения штока мембраны входят в допустимые значения.

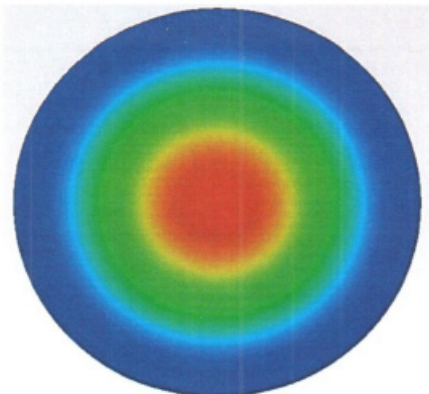


Рис. 6. Эпюра возникающих перемещений

Произведем исследование с минимально возможной толщиной мембраны исходя из допуска на размер, толщина составляет $0,23\text{ мм}$ (рис. 7).

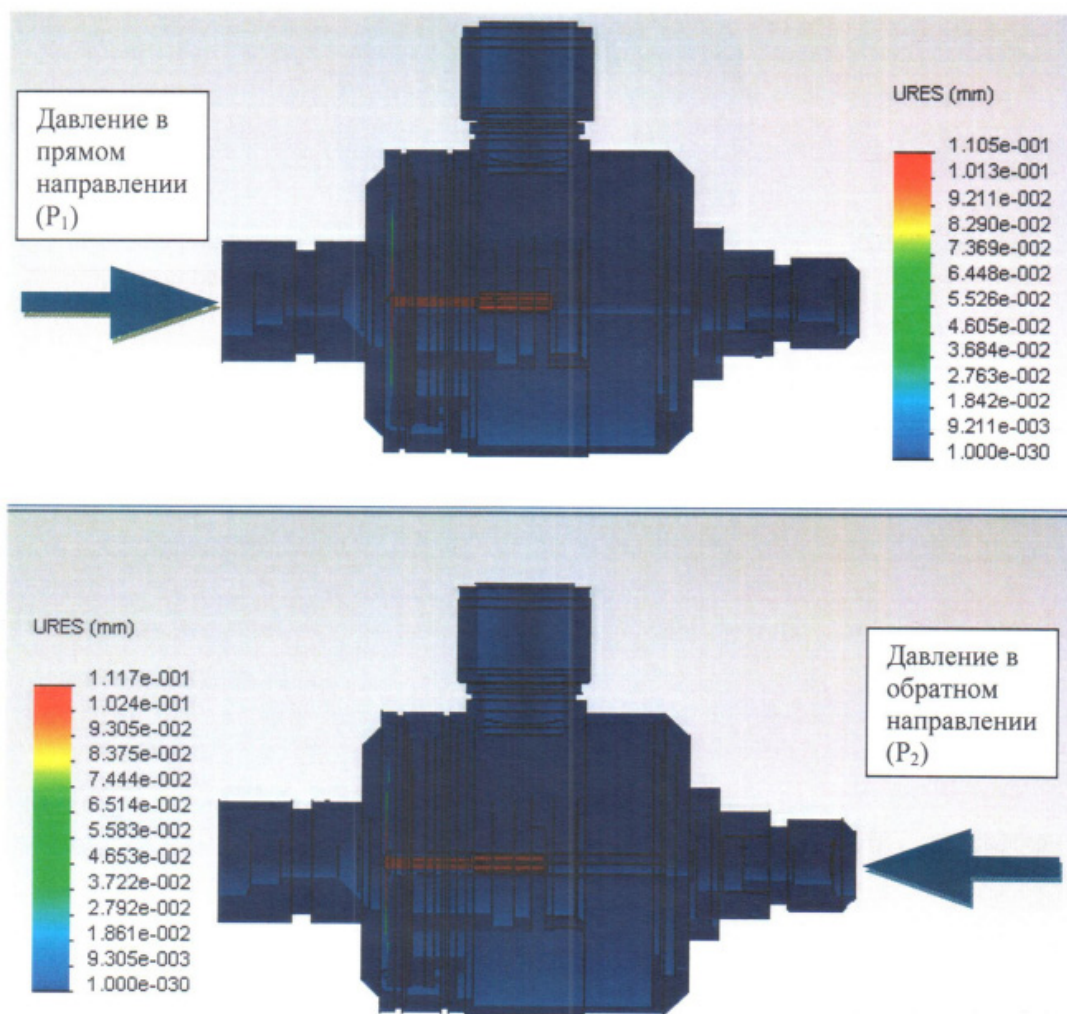


Рис. 7. Эпюра перемещения с учетом допусков в прямом и обратном направлении

Изменив мембрану, по нижнему допуску 0,23 мм получились результаты 110,5 мкм в прямом направлении и 111,7 мкм в обратном. По результатам проведенных исследований для мембран 0,25; 0,24; 0,22 мм, при номинальном давлении 0,03 МПа построен график зависимости прогиба мембраны от ее толщины (рис. 8).

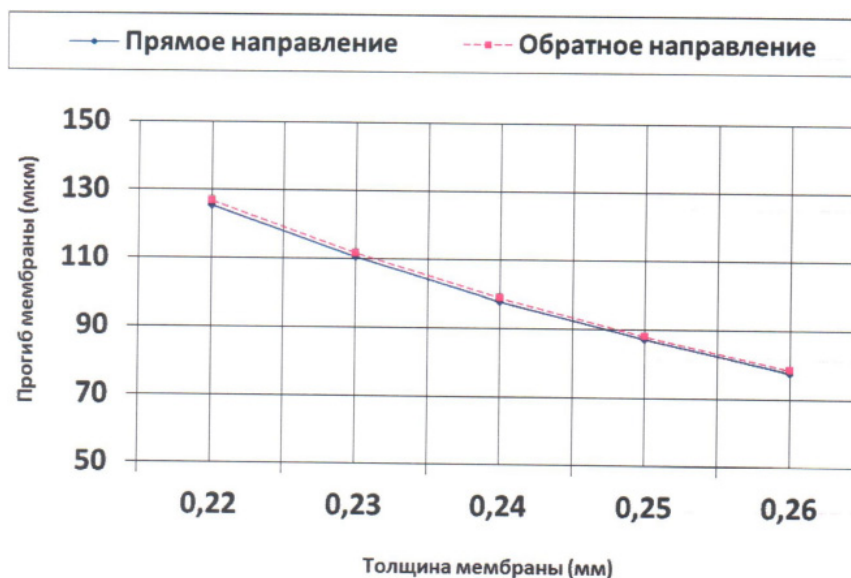


Рис. 8. Зависимости прогиба мембраны от ее толщины

В результате исследования выявлена зависимость изменения значения прогиба, он увеличивается с уменьшением толщины мембраны. Все значения прогиба мембраны лежат в пределах от 70 до 150 мкм. При номинальной толщине мембраны 0,26 мм перемещения мембраны близки к нижнему значению диапазона 70 мкм и составляют 77–78 мкм. Данные перемещения мембраны могут привести к выходу за допустимые значения величины давлений при подстройке.

Различие между прямым и обратным ходом объясняется асимметрией мембраны, различным значением площади контакта с рабочей средой из-за наличия жесткого центра со стороны обратного хода.

Проверка адекватности построенной модели

Рассмотрим упрощенную идеализированную модель тонкостенной круглой пластины, жестко заделанной по краям и имеющей в центре цилиндрический жесткий центр. Схожим образом закреплена мембрана датчика (рис. 9), для которого жестким центром является шток.

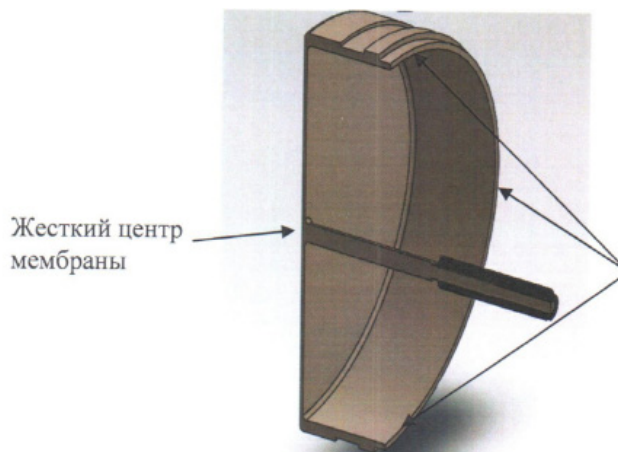


Рис. 9. Внешний вид мембраны

Аналитически максимальный прогиб тонкостенной круглой пластины можно выразить следующей формулой [5]:

$$w_{\max}(h) = \frac{3P(1-\nu^2)}{16Eh^3} \left[R^4 - 3a^4 - 4R^2a^2 \left(1 + \ln \frac{R}{a} \right) + \frac{16R^2a^4}{R^2 - a^2} \left(\ln \frac{R}{a} \right)^2 \right],$$

где P – равномерное давление по всей поверхности пластины; h – толщина пластины; ν – коэффициент Пуассона; R – радиус пластины; a – радиус жесткого центра.

При построении кривой зависимости (рис. 10) использованы следующие параметры: $P = 0,03$ МПа, $E = 1,8 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,28$, $R = 16$ мм, $a = 0,95$ мм.

График зависимости максимального прогиба от толщины пластины представлен на рис. 10.

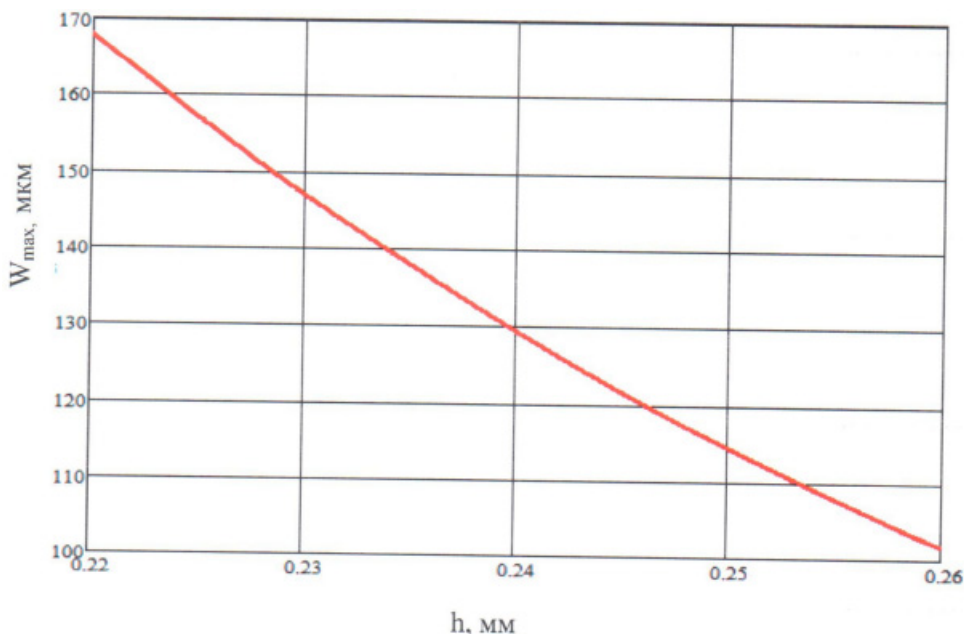


Рис. 10. Зависимость максимального прогиба от толщины пластины

Сравнение диаграмм, приведенных на рис. 8 и 10, показало совпадение форм кривых (монотонность, кривизна и т. д.), подтверждающее верность использованного приближения и численного результата.

Заключение

Проанализировав данные, можно утверждать, что для повышения чувствительности мембраны к перепадам давления ее толщина должна составлять 0,22–0,25 мм. В этом диапазоне прогиб мембраны лежит в пределах от 90 до 120 мкм. Для обеспечения оптимальной работы датчика с мембраной и расчетным давлением 0,03 МПа следует ужесточить размер толщины мембраны до 0,25_{-0,03}.

Список литературы

1. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа // Датчики и системы. 2014. № 7. С. 22–25.
2. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.
3. 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.
4. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 18–25.

5. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 51–55.

References

1. Musaev R. Sh., Trofimov A. A., Frolov M. A. Imitatsionnoe modelirovanie chuvstvitel'nogo elementa datchika davleniya strunnogo tipa // Datchiki i sistemy. 2014. № 7. S. 22–25.
2. Bastrygin K. I., Trofimov A. A., Baranov A. S. [i dr.]. Imitatsionnoe modelirovanie p'ezoelektricheskogo datchika davleniya // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. 2017. № 1. S. 20–28.
3. Dmitrienko A. G., Blinov A. V., Trofimov A. N., Trofimov A. A. Tendentsii razvitiya datchikov, preobrazovateley i na ikh osnove sistem izmereniya, monitoringa i kontrolya tekhnicheski slozhnykh ob"ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki // Datchiki i sistemy. 2012. № 9. S. 4–6.
4. Bastrygin K. I., Trofimov A. A. Sistema izmereniya, monitoringa, kontrolya i diagnostiki parametrov raketnogo dvigatelya // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. 2017. № 3. S. 18–25.
5. Musaev R. Sh., Trofimov A. A., Frolov M. A. Imitatsionnoe modelirovanie chuvstvitel'nogo elementa tenzorezistivnogo datchika absolyutnogo davleniya // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. 2012. № 2. S. 51–55.

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Николаевич Пономарев

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: revik2296@gmail.com

Vladislav N. Ponomarev

Design engineer,
Scientific Research Institute
of 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: alex.t1978@mail.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)

Кирилл Игоревич Бастрыгин

главный специалист,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: sensor@niifi.ru

Kirill I. Bastrygin

Chief specialist,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Иван Евгеньевич Смирнов

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

Ivan E. Smirnov

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

**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

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

А. С. Ишков

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена необходимостью принимать управленческие решения по обеспечению надежности изделий электронной техники в условиях недостаточной информации и при неизвестных алгоритмах решения задачи. Показаны преимущества использования современных информационных технологий для автоматизации процесса формирования управленческого решения на разных этапах жизненного цикла изделия. Предложена система поддержки принятия решения, позволяющая оценивать показатели надежности изделий электронной техники с использованием элементов искусственного интеллекта и уникальных знаний экспертов. *Материалы и методы.* Компьютерная система поддержки принятия решений для обеспечения надежности вакуумных изделий в общем случае включает модули управления, обработки, хранения, а также программного обеспечения, обеспечивающего ввод и вывод информации, в том числе в графической форме. База данных системы содержит компьютерную модель изделия, включающую описание технических характеристик изделия, методики испытаний, методы расчета и прогнозирования показателей надежности и способы анализа влияния материалов и технологии изготовления на качество изделия. *Результаты.* Обоснована эффективность использования системы поддержки принятия решения за счет снижения материальных и временных затрат на натурные испытания изделий. *Выводы.* Представлен алгоритм работы системы поддержки принятия решения для оценки показателей надежности вакуумных изделий, в основу которого положена математическая модель времени натекания молекул водорода и гелей через вакуумно-плотную оболочку изделия. Показана возможность комбинации различных сочетаний параметров изделия, а также уровней внешних воздействующих факторов для достижения заданных значений показателей надежности.

Ключевые слова: надежность, экспертная система, вакуумные выключатели, алгоритм, натекание, вакуум, температура

Для цитирования: Ишков А. С. Система поддержки принятия решения для оценивания показателей надежности изделий электронной техники // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 16–23. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-2

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR EVALUATION RELIABILITY INDICATORS OF ELECTRONIC PRODUCTS

A.S. Ishkov

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

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is due to the need to make management decisions to ensure the reliability of electronic products in conditions of insufficient information and unknown algorithms for solving the problem. The advantages of using modern information technologies to automate the process of forming a management decision at different stages of the product life cycle are shown. A decision support system is proposed that allows evaluating the reliability indicators of electronic products using elements of artificial intelligence and unique expert knowledge. *Materials and methods.* A computer decision support system for ensuring the reliability of vacuum products generally includes modules for control, processing, storage, as well as software that provides input and output of information, including in graphical form. The system database contains a computer model of the product, including a description of the technical characteristics of the product, test methods, methods for calculating and predicting reliability indicators, and methods for analyzing the effect of materials and manufacturing technology on product quality. *Results.* The effectiveness of using the decision support system by reducing the material and time costs for full-scale testing of products is substantiated. *Conclusions.* An algorithm for the operation of a decision support system for evaluating the reliability indica-

tors of vacuum products is presented, which is based on a mathematical model of the time of leakage of hydrogen molecules and gels through a vacuum-tight shell of a product. The possibility of a combination of various combinations of product parameters, as well as levels of external influencing factors to achieve the specified values of reliability indicators is shown.

Keywords: reliability, expert system, vacuum switches, algorithm, leakage, vacuum, temperature

For citation: Ishkov A.S. Decision support system for evaluation reliability indicators of electronic products. *Izmenenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):16–23. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-2

Введение

В настоящее время одной из важных проблем измерительной техники является поиск путей по повышению достоверности и точности оценивания показателей надежности изделий электронной техники (ИЭТ). На сегодняшний день область знаний, посвященная проблемам надежности ИЭТ, характеризуется большими объемами информационных ресурсов, которые содержат методики проведения испытаний на надежность, методы прогнозирования показателей надежности различных групп и типов радиоэлектронных компонентов. Накоплены массивы экспериментальных данных по влиянию на качество изделий различных внешних воздействующих факторов, виды отказов и причины, их вызывающие [1].

В связи с увеличением сложности ИЭТ и возрастающими требованиями к их качеству и надежности увеличивается значимость проблемы доступа к уже накопленным на различных предприятиях, научных организациях объемам различной информации, касающейся надежности [2]. Особенностью области знаний, посвященной проблеме надежности, является то, что большая часть знаний является личным опытом специалистов высокого уровня (экспертов) в области надежности [1]. Экспертам часто приходится принимать управленческие решения для обеспечения надежности ИЭТ в условиях недостаточной информации, при неизвестных алгоритмах решения поставленной задачи, а также в условиях риска получения неудовлетворительного результата при существенных понесенных материальных и временных затратах. Это обусловлено тем, что современные многофункциональные ИЭТ повышенной сложности характеризуются большим количеством контролируемых параметров, которые различаются по своей информативности и степени доступности, а также различными условиями эксплуатации. Процесс исследования и оценки показателей надежности таких изделий, особенно на этапе их разработки, характеризуется либо принятием решений в условиях высокой степени неопределенности, либо требует значительных затрат материальных и временных ресурсов для проведения испытаний и различных экспериментальных исследований [3]. Непрерывное техническое усложнение ИЭТ предъявляет требования к постоянному повышению квалификации разработчиков изделий, конструкторов, инженеров, персоналу испытательных лабораторий. Все это подтверждает возрастающее влияние человеческого фактора на обеспечение надежности изделий.

Постановка задачи исследования

Имеющиеся знания (математические модели, методики испытаний и расчета) довольно слабо структурированы, так как имеется множество типов и видов ИЭТ, режимов и условий их работы, соответственно, имеют место различные требования к показателям надежности, методам и способам их подтверждения и оценки. Широко применяемыми способами оценки показателей надежности ИЭТ являются испытания, прогнозирование и расчет [4]. К настоящему времени для анализа надежности отдельных видов ИЭТ разработана и накоплена большая база знаний как теоретического, так и прикладного характера. Задача расчета и моделирования показателей надежности решается применением различных математических моделей, большей частью основанных на методах теории вероятностей и математической статистики. Этот факт позволяет автоматизировать процесс выполнения соответствующих работ. Однако другие этапы работы, такие как выбор исходных данных и методики расчета, анализ и инженерная интерпретация результатов, выполняются вручную из-за их сложной формализуемости [5]. В результате качество итоговых результатов анализа показателей надежности ИЭТ существенно зависит от квалификации исполнителей. Кроме того, усложнение структуры и пара-

метров современных ИЭТ приводит к увеличению трудоемкости анализа и расчета показателей надежности. К тому же необходимо также учитывать влияние различных внешних воздействий (механических, температурных, электрических и т.п.) на показатели надежности ИЭТ. Это обстоятельство приводит к тому, что инженерные методики анализа надежности становятся все более сложными для практического применения [1]. Эволюция вычислительной техники и средств коммуникации несет за собой новые возможности обработки информации и повышает актуальность проблемы переноса части интеллектуальной сферы человеческой деятельности в сферу автоматизации принятия управленческих решений и реализации цифровой поддержки процесса решения задач в области обеспечения надежности ИЭТ [6].

Анализ методов исследования

К числу эффективных методов, обеспечивающих автоматизированную поддержку принятия управленческих решений в целях обеспечения надежности ИЭТ, относится внедрение информационных технологий [1]. Наличие и использование компьютерной системы для обеспечения надежности, аккумулирующей базу знаний, становятся незаменимыми в условиях повседневной деятельности предприятий разработчиков и изготовителей ИЭТ. В связи с этим данная предметная область, безусловно, нуждается в системе поддержки принятия решения (СППР), выполняющей информационную, методическую и организационную работу. Таким образом, теория и практика по решению проблем обеспечения надежности ИЭТ требуют не только разработки методик проведения испытаний на надежность, методов оценки показателей надежности и автоматизированной аппаратуры для проведения испытаний, но и создания информационно-экспертных систем для обеспечения доступа ко всему накопленному опыту и знаний в области надежности с целью более полного и оперативного его использования.

Анализ принципа работы и структуры системы поддержки принятия решения

В общем случае СППР относятся к информационным экспертным системам и представляют собой достаточно сложные программные комплексы, в которых собраны знания и опыт специалистов с целью его использования другими пользователями при наличии у них такой необходимости. Для экспертных систем в области исследования и оценки надежности ИЭТ целесообразно их построение и использование на основе искусственного интеллекта с целью принятия управленческих решений в автоматизированном режиме с учетом конкретной задачи и исходных данных. Подобное решение позволит создать компьютерную модель конкретного типа ИЭТ, поддерживающую период всего его жизненного цикла, начиная с решения проблем оценки показателей надежности на этапе разработки до получения экспериментальных данных по результатам эксплуатации в аппаратуре потребителей [4]. Математические модели, описывающие функционирование изделия, методики расчета показателей надежности, результаты натурных испытаний и сведения, полученные в ходе эксплуатации, загружаются в виртуальную информационную среду. Такая компьютерная модель должна включать основные технические характеристики конкретного типа ИЭТ, числовая оценка показателей надежности в различных режимах и условиях работы и хранения, методики испытаний на безотказность и сохраняемость, методики прогнозирования показателей надежности, оценки влияния основных материалов и комплектующих, а также особенности технологии изготовления на показатели надежности. В результате создается полное электронное описание изделия.

Для технической реализации подобной компьютерной модели и ее эксплуатации в рамках экспертной системы необходимо привлечение экспертов для получения теоретической информации и экспериментальных данных о конкретных видах ИЭТ и инженеров-программистов [2]. Представление информации от экспертов в виде базы знаний и применение методов логической обработки позволит получить специализированную экспертную систему с визуально-графическим представлением в виде совокупности программных модулей, наделенную свойствами: иерархичности, модульности, объектно-ориентированности. В области обеспечения надежности ИЭТ подобная экспертная система позволит проводить моделирование режимов воздействия на испытуемое изделие и принимать более обоснованные управляющие решения по его результатам.

Обобщенная структурная схема СППР, обеспечивающая поддержку принятия решений для оценивания параметров надежности ИЭТ, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема СППР для оценивания параметров надежности

Обобщенная структурная схема СППР включает модули управления, обработки, хранения, а также программного обеспечения, создающего условия для ввода и вывода информации, в том числе в графической форме.

Предложенная СППР позволяет осуществить поиск решений, построенных на базе формализованных уникальных знаний экспертов. Система отличается использованием элементов искусственного интеллекта для обработки значительных объемов информации и позволяет уменьшить влияние субъективного фактора при формировании управленческого решения.

Алгоритм, принцип действия и возможности системы поддержки принятия решения для оценивания параметров надежности вакуумных изделий

Автором показана возможность получения результатов расчета и моделирования показателей надежности ИЭТ, принятия управленческих решений с помощью предложенной СППР на примере высокочастотных вакуумных выключателей и переключателей (далее – ВКУ).

ВКУ относятся к классу нейтральных электромагнитных реле контактного типа и широко используются в радиотехнических объектах в качестве коммутирующих элементов в высоковольтных цепях при напряжении 5 кВ и токе 12 А. Диапазон рабочих частот составляет от 1,5 до 80 МГц. Из-за использования в объектах ответственного назначения к надежности ВКУ предъявляются жесткие требования – изделия должны обеспечивать не менее 1106 коммутационных операций при допустимом количестве самоустраниющихся сбоев в среднем не более 1 на 3104 коммутационных операции для каждой контактной пары. Конструкция переключателя представляет собой вакуумную камеру, состоящую из металлокерамического корпуса, механизма перемещения подвижного контакта (замыкателя) и привода открытого или поляризованного типа (электромагнита). Контактная система состоит из двух неподвижных и одного подвижного контактов, расположенных с заданным зазором относительно друг друга внутри металлокерамической оболочки, в объеме которой создан высокий вакуум, служащий рабочим диэлектриком переключателя [7].

Качество ВКУ, его показатели надежности, а также эксплуатационные и технические характеристики в значительной степени зависят от магнитных свойств материала магнитопровода, от показателей силы трения в подвижных частях изделия, определяемых качеством материалов и конструкции вакуумно-плотной металлокерамической оболочки [8]. Таким образом, показатели надежности ВКУ в значительной степени зависят от того, насколько долго

будет поддерживаться заданное значение рабочего вакуума в вакуумно-плотной металлокерамической оболочке изделия.

Сложность принятия управленческих решений по обеспечению надежности ВКУ связана со сложностью изделия и, как следствие, с большим количеством учитываемых факторов, альтернатив и ограничений (сложная логика суждений и сложные взаимосвязи), а также с итерационным характером процесса принятия решения.

Научно обоснованная методика расчета и прогнозирования показателей надежности ВКУ на стадии их разработки положена в основу алгоритма работы, описываемой СППР. Методика заключается в определении времени сохранения вакуума в вакуумированном объеме ВКУ с помощью расчета интенсивности «натекания» – диффузии легких атмосферных газов (водорода и гелия) через вакуумно-плотную оболочку изделий в зависимости от параметров внешних воздействующих факторов. Алгоритм работы СППР для оценивания показателей надежности ВКУ приведен на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм работы СППР для анализа надежности ВКУ

Процесс оценки параметров надежности ВКУ связан с принятием решений о том, какие параметры и как контролировать, какие использовать математические модели и виды контроля, какие методики применять для анализа полученной информации. Ситуация многокритериального принятия решений формально описывается следующей моделью, состоящей из совокупности входных $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и выходных параметров $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$. Поддержка принятия решений представляется задачей формирования и выбора лучшей альтернативы из различных комбинаций исходных данных [5].

В формализованном виде требуется найти набор входных параметров, которые обеспечивают минимум целевой функции (Y) в виде взвешенной суммы рассогласований по каждому заданному критерию: $Y = \min \sum_{i=1}^m k_i (f_i(x) - f_i^0)$, где k_i – весовой коэффициент i -го критерия; f_i^0 – требуемое значение критерия. На стадии разработки ВКУ конструктор может комбинировать различные сочетания параметров изделия, уровни внешних воздействующих факторов, чтобы обеспечить требуемые показатели надежности. Интерфейс системы позволяет вводить значения параметров для расчета, указывать вид и марку применяемых в изделии материалов, манипулировать ими для составления различных сочетаний и оперативно получать различные варианты результатов.

Для функционирования предложенной СПИР применены математические модели, которые наполняют базу знаний и позволяют рассчитать время сохранения вакуума в изделии. В результате проведенных исследований разработчиками ВКУ установлено, что время натекания наиболее интенсивно проникающих газов из атмосферы водорода и гелия в вакуумно-плотную металлокерамическую оболочку изделия зависит от геометрических размеров вакуумированного объема, физических и химических параметров материалов изделия, условий внешних воздействующих факторов [8]. В целях прогнозирования показателей надежности ВКУ в качестве параметров математической модели, позволяющих ускорить процесс натекания легких газов в вакуумированный объем ВКУ, является повышенная температура и избыточное внешнее давление сверх нормального.

При исследовании влияния температуры на гамма-процентную наработку ВКУ экспертами-разработчиками данных изделий было обосновано использование формулы Френкеля:

$$t_{is} = t_0 \exp\left(\frac{E_{i\text{дес}}}{RT}\right),$$

где T – температура вакуумно-плотной оболочки; $E_{i\text{дес}}$ – энергия активации десорбции адсорбентов (металлов и керамики); t_0 – коэффициент, связанный с периодом колебаний атомов на поверхности адсорбента; R – универсальная газовая постоянная.

Формула Френкеля положена в основу математической модели системы поддержки принятия решений, позволяющей автоматизированным способом производить расчет времени пребывания молекул наиболее интенсивно проникающих газов из атмосферы (водорода на поверхности металлических элементов вакуумно-плотной оболочки и гелия на поверхности керамической оболочки). На рис. 3 приведен вид интерфейса системы поддержки, содержащий график зависимости гамма-процентной наработки одного из образцов ВКУ в зависимости от температуры на вакуумном выключателе.

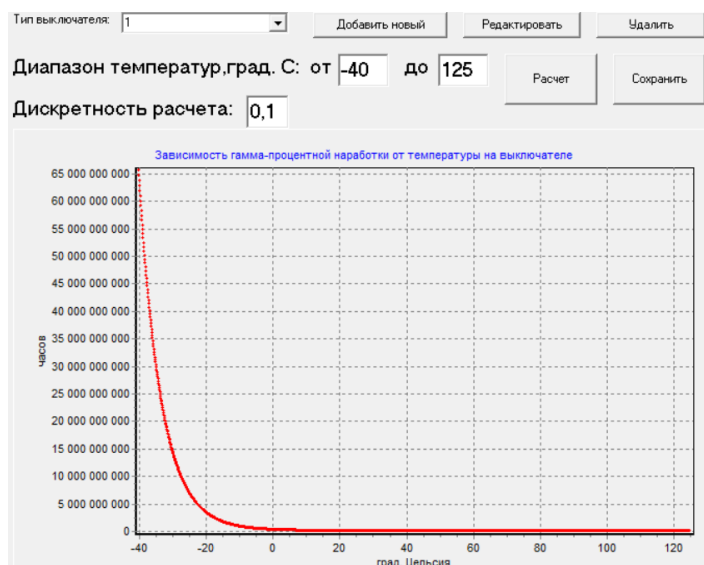


Рис. 3. График зависимости гамма-процентной наработки ВКУ в зависимости от температуры

Таким образом, конструктор изделия с помощью предложенной СППР может оперативно, в сжатые сроки и без существенных материальных затрат проводить исследование влияния различных конструктивных параметров изделия и уровней внешних воздействующих факторов на показатели надежности ВКУ. При необходимости система поддержки позволяет на основе рассчитанных показателей надежности формировать рекомендации разработчикам по корректировке различных аспектов проектных решений ВКУ и технологического процесса его изготовления.

Заключение

Предложенная в работе СППР обладает высокой адаптивностью к режимам моделирования ИЭТ, обеспечивает возможность ввода различных технических параметров изделия. Это позволяет выполнять моделирование показателей надежности и применять методы структурной оптимизации при наличии альтернативных вариантов комплектующих. Использование для различных изделий ИЭТ с однородными параметрами методик и математических моделей, разработанных экспертами-профессионалами конкретной предметной области, позволяет значительно снизить стоимость процесса оценки надежности ИЭТ и увеличить достоверность получаемых результатов. Предложенная СППР эффективно используется при экспериментальных исследованиях при разработке новых ИЭТ с целью оценки качества функционирования испытуемого изделия в различных условиях внешних воздействий, для сравнения вариантов технических решений, проверки запасов работоспособности во всех режимах функционирования и т.д.

Внедрение предложенной СППР на предприятия электронной промышленности позволяет исключить проведение многочисленных натурных испытаний, тем самым снизить себестоимость ИЭТ за счет сокращения затрат как на испытательное оборудование, так и на дорогостоящие испытательные образцы. Предложенная СППР обладает возможностью обучения путем актуализации формализованных знаний экспертов, а также знаний об удачных и неудачных попытках решения задач ее пользователями. Для повышения эффективности использования предложенной СППР целесообразно ее интегрировать в информационную систему предприятия собой и создавать с последней единое информационное пространство. Это позволит обеспечить единую поддержку данных, исключить дублирование информации и упростить работу пользователей.

Список литературы

1. Зуров Е. В. Информационная технология принятия решений при управлении сложными объектами с оценкой технического состояния на основе экспертных систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 16 с.
2. Юрков Н. К., Алмаметов В. Б., Држевецкий Ю. А. Методология экспертных систем в анализе надежности сложных технических систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2010. Т. 2. С. 439–440.
3. Избачков Ю. С., Петров В. Н. Информационные системы : учебник для вузов. 2-е изд. СПб. : Питер, 2015. 656 с.
4. Колчин А. Ф., Овсянников М. В., Стрекалов А. Ф., Сумароков С. В. Управление жизненным циклом продукции. М. : Анахарсис, 2012. 345 с.
5. Норенков И. П., Кузьмик П. К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 245 с.
6. Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочников Е. И. Реинжиниринг и автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении. СПб. : Политехника, 2017. 152 с.
7. Ишков А. С., Чураков П. П. Контроль магнитных параметров при изготовлении высокочастотных вакуумных устройств // Контроль. Диагностика. 2006. № 3. С. 17–19.
8. Ишков А. С. Измерение магнитных характеристик материалов вакуумных коммутирующих устройств : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2006. 22 с.
9. Солодовников Д. С., Абызгильдин А. Ю. Визуализация технологического процесса // Теория и практика процессов химтехнологии (Марушкинские чтения) : материалы Всерос. науч. конф. Уфа : УГНТУ, 1996. С. 96.
10. Красильников В. Эволюция экспертных систем. История и перспективы. URL: <http://www.kv.by/index2005401103.htm>

References

1. Zurov E.V. *Information technology of decision-making in the management of complex objects with an assessment of the technical condition based on expert systems*. PhD abstract. Saint Petersburg, 2007:16. (In Russ.)
2. Yurkov N.K., Almametov V.B., Drzhevetskiy Yu.A. Methodology of expert systems in reliability analysis of complex technical systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2010;2:439–440. (In Russ.)
3. Izbachkov Yu.S., Petrov V.N. *Informatsionnye sistemy: uchebnik dlya vuzov. 2-e izd. = Information systems : textbook for universities. 2nd ed.* Saint Petersburg: Piter, 2015:656. (In Russ.)
4. Kolchin A.F., Ovsyannikov M.V., Strelkov A.F., Sumarokov S.V. *Upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii = Product lifecycle management*. Moscow: Anakharsis, 2012:345. (In Russ.)
5. Norenkov I.P., Kuz'mik P.K. *Informatsionnaya podderzhka naukoemkikh izdeliy. CALS-tehnologii = Information support of high-tech products. CALS-technologies*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2015:245. (In Russ.)
6. Zil'berburg L.I., Molochnik V.I., Yablochnikov E.I. *Reinzhiniring i avtomatizatsiya tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva v mashinostroenii = Reengineering and automation of technological preparation of production in mechanical engineering*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2017:152. (In Russ.)
7. Ishkov A.S., Churakov P.P. Control of magnetic parameters in the manufacture of high-frequency vacuum devices. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2006;(3):17–19. (In Russ.)
8. Ishkov A.S. *Measurement of magnetic characteristics of materials of vacuum switching devices*. PhD abstract. Penza, 2006:22. (In Russ.)
9. Solodovnikov D.S., Abyzgil'din A.Yu. Visualization of the technological process. *Teoriya i praktika protsessov khimtekhnologii (Marushkinskie chteniya): materialy Vseros. nauch. konf. = Theory and practice of chemical technology processes (Marushkin readings) : materials of the All-Russian scientific conf.* Ufa: UGNTU, 1996:96. (In Russ.)
10. Krasil'nikov V. *Evolyutsiya ekspertnykh sistem. Istoriya i perspektivy = Evolution of expert systems. History and prospects*. (In Russ.). Available at: <http://www.kv.by/index2005401103.htm>

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Сергеевич Ишков

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

Anton S. Ishkov

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

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

Поступила в редакцию/Received 04.04.2022

Поступила после рецензирования/Revised 13.05.2022

Принята к публикации/Accepted 10.06.2022

УДК 004.932.2
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-3

ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕГО УРОВНЯ ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ

А. В. Григорьев

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
kipra@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Вибрационный сигнал, генерируемый или преобразуемый объектом, как естественного, так и техногенного происхождения несет большой объем информации о состоянии и свойствах этого объекта. Это обстоятельство способно оказать большую помощь в деле обеспечения безопасности нашей жизни и в других сферах, но при условии правильного извлечения и интерпретации этой информации. Несвершенство применяемых в настоящее время методов измерения параметров вибрации является препятствием к достижению поставленной цели. Это препятствие предлагается преодолеть посредством внедрения новой методологии измерения параметров вибрации. *Материалы и методы.* Сущность предлагаемой методологии заключается в том, что вместо последовательности разнесенных во времени мгновенных значений измеряемого параметра вибрации или комплексного функционала, составленного из значений нескольких таких параметров, анализируется изображение нанесенной на поверхность объекта контроля круглой метки. Регистрирующее устройство формирует серии изображений круглой метки, как с вибрационным размытием, так и без такового. Об интенсивности вибрационного процесса судят на основе анализа серии относительных вибрационных приращений площади изображения круглой метки с вибрационным размытием. *Результаты и выводы.* Изложен принцип оценивания интенсивности вибрационного сигнала. Представлено семейство кривых, отражающих приведенную методическую погрешность измерения интенсивности вибрации на основе анализа вибрационного приращения площади изображения круглой метки. Рассмотрен числовой пример определения предельной абсолютной методической погрешности такого измерения. Проведено сравнение показателей представленного в статье метода измерения с аналогичными показателями контактного виброметра *BALTECH VP-3470-Ex*.

Ключевые слова: вибрация, измерение, изображение, круглая метка, размытие, вибрационное перемещение, вибрационное приращение, площадь изображения, пиксел

Для цитирования: Григорьев А. В. Оценка методической погрешности измерения общего уровня вибрации на основе анализа размытия изображения круглой метки // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 24–30. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-3

EVALUATION OF THE METHODOLOGICAL ERRORS OF MEASURING THE GENERAL VIBRATION LEVEL BASED ON THE IMAGE BLUR ANALYSIS OF A ROUND BAR

A.V. Grigoriev

Penza State University, Penza, Russia
kipra@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* A vibration signal generated or transformed by an object, both natural and man-made, carries a large amount of information about the state and properties of this object. This circumstance can be of great help in ensuring the safety of our lives in other areas, but subject to the correct extraction and interpretation of this information. The imperfection of currently used methods for measuring vibration parameters is an obstacle to achieving this goal. This obstacle is proposed to be overcome by introducing a new methodology for measuring vibration parameters. *Materials and methods.* The essence of the proposed methodology lies in the fact that instead of a sequence of time-spaced instantaneous values of the measured vibration parameter or a complex functional composed of the values of several such parameters, an image of a round mark applied to the surface of the test object is analyzed. The recording device forms a series of images of a round mark, both with and without vibration blur. The intensity of the vibrational process is judged based on the analysis of a series of relative vibrational increments of the image area of a round mark with vibrational

blur. *Results and conclusions.* The principle of vibration signal intensity estimation is stated. A family of curves is presented, reflecting the reduced methodological error of measuring the intensity of vibration based on the analysis of the vibrational increment of the area of the image of a round mark. A numerical example of determining the limiting absolute methodological error of such a measurement is considered. The indicators of the measurement method presented in the article are compared with those of the contact vibrometer *BALTECH VP-3470-Ex*.

Keywords: vibration, measurement, image, round mark, blur, vibration displacement, vibration increment, image area, pixel

For citation: Grigoriev A.V. Evaluation of the methodological errors of measuring the general vibration level based on the image blur analysis of a round bar. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):24–30. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-3

Введение

Вибрационный сигнал несет большой объем информации о состоянии, внутренней структуре и свойствах объекта контроля. При этом объекты контроля могут быть самые различные: радиоэлектронная аппаратура, машины и механизмы, пешеходные, автомобильные и железнодорожные мосты, здания и сооружения, фрагменты литосферы Земли и др. [1]. По причине несовершенства существующих методов измерения и анализа вибраций в настоящее время используется только очень небольшая часть этой информации [2]. Предпринимается попытка восполнить этот пробел с помощью новой методологии измерения параметров вибрации, в которой анализ ряда разнесенных во времени мгновенных значений этих параметров заменен анализом изображения тестового объекта круглой формы (круглой метки) с вибрационным размытием [3–6]. Методики восстановления геометрических параметров следа вибрационного размытия изображения круглой метки и поиска периферийных точек главного линейного сечения этого следа изложены в статьях [7] и [8] соответственно. Весьма плодотворным представляется подход, в котором структурный анализ следа вибрационного размытия изображения круглой метки сочетается с его анализом статистическим [9]. А в статье [10] проведено исследование возможности применения анализа изображения круглой метки для контроля технического состояния механизмов. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении элемента поверхности проведен в статье [11].

Принцип оценивания интенсивности вибрационного сигнала

На рис. 1 представлена схема измерения параметров механических колебаний на основе анализа изображения тестового объекта круглой формы с вибрационным размытием.

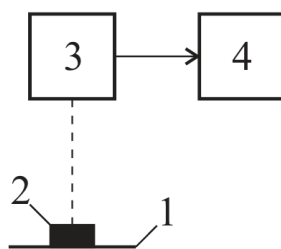


Рис. 1. Схема измерения параметров механических колебаний на основе анализа изображения тестового объекта круглой формы с вибрационным размытием

Принцип измерения заключается в том, что на поверхности объекта контроля 1 закрепляется тестовый объект круглой формы (круглая метка) 2. Способы закрепления могут быть различными, например, это может быть нанесение плоского объекта круглой формы краской на поверхность, прикрепление скотчем листка бумаги, на котором изображен такой объект и т.д. Изображение круглой метки 2 фиксируется регистрирующим устройством 3, в качестве которого может выступить, например, видекамера. Изображение, сформированное регистрирующим устройством 3, передается в вычислительное устройство 4, где подвергается обработке и анализу.

Вибрационное перемещение исследуемого элемента поверхности объекта контроля осуществляется по сложной траектории. У вибрационного процесса отсутствуют такие параметры, как амплитуда, размах, среднеквадратичное значение. Для того, чтобы какие-то характеристические параметры появились, следует сформировать некоторые инварианты этих параметров, например, инвариант интенсивности вибрации. В качестве такого инварианта принимается относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки. Реальное вибрационное перемещение элемента поверхности замещают таким эквивалентным прямолинейным перемещением по гармоническому закону, при котором относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки равно значению того же параметра при реальном вибрационном процессе.

По определению:

$$\delta_{Simt} = \frac{S_{imtx} - S_{imt0}}{S_{imt0}}, \quad (1)$$

где δ_{Simt} – относительное вибрационное приращение площади изображения круглой метки; S_{imtx} – площадь изображения круглой метки с вибрационным размытием (контрольное значение площади изображения круглой метки); S_{imt0} – площадь изображения круглой метки без вибрационного размытия (опорное значение площади изображения круглой метки).

На рис. 2 представлена модель формирования изображения круглой метки с вибрационным размытием при прямолинейном гармоническом перемещении ее оригинала в плоскости объекта.

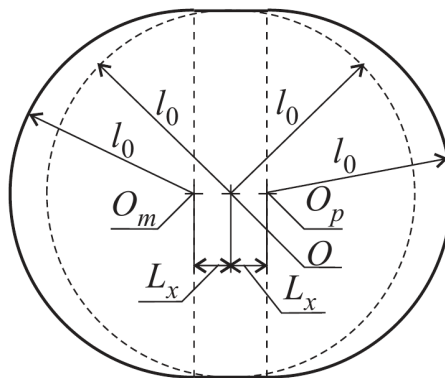


Рис. 2. Модель формирования изображения круглой метки с вибрационным размытием при прямолинейном гармоническом перемещении ее оригинала в плоскости объекта

Точка O , являющаяся изображением исследуемого элемента поверхности объекта контроля, совершает эквивалентное прямолинейное вибрационное перемещение по гармоническому закону между двумя предельными точками O_p и O_m . Расстояние L_x является амплитудой этого перемещения. Вместе с точкой O такое же перемещение совершает изображение круглой метки. Радиус этого изображения l_0 . Четкое изображение круглой метки на исходной позиции при отсутствии вибрации на рис. 2 показано штриховой линией. В результате этого перемещения формируется след вибрационного размытия изображения круглой метки, внешний контур которого на рис. 2 показан сплошной основной линией. Этот след состоит из трех сегментов, границы которых внутри следа показаны штриховой линией. Два периферийных сегмента следа вибрационного размытия изображения круглой метки представляют собой полуокружности радиуса l_0 , а центральный сегмент представляет собой прямоугольник со сторонами $2l_0$ и $2L_x$.

Поскольку изображение подобно оригиналу:

$$\frac{r_t}{l_0} = \frac{A_x}{L_x}, \quad (2)$$

где r_t и l_0 – радиусы круглой метки (в микрометрах) и ее изображения (в пикселах) соответственно; A_x и L_x – вибрационные перемещения тестового элемента поверхности (в микрометрах) и его изображения (в пикселах) соответственно.

Отсюда, принимая во внимание формулу (1), описание геометрии следа вибрационного размытия изображения круглой метки по рис. 2 и проведя несложные математические преобразования:

$$A_x = r_t \frac{\pi}{4} \delta_{S_{imt}}. \quad (3)$$

Оценка погрешности измерения интенсивности вибрации

На рис. 3 представлено семейство кривых, отражающих приведенную погрешность измерения эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения как функцию истинного значения этой величины, измеренной в единицах радиуса круглой метки, при различных значениях площади изображения этой метки.

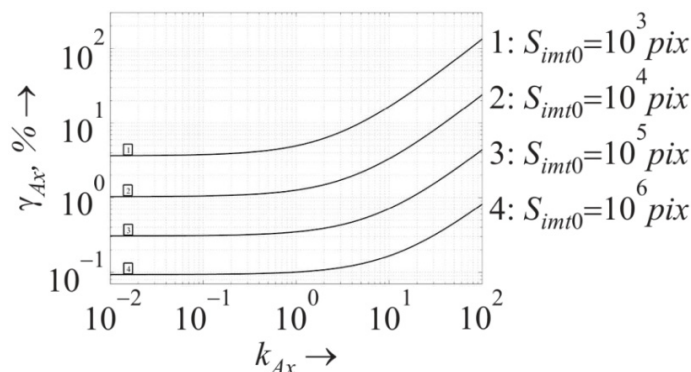


Рис. 3. Семейство кривых, отражающих приведенную погрешность измерения эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения как функцию истинного значения этой величины, измеренной в единицах радиуса круглой метки, при различных значениях площади изображения этой метки

Коэффициент вибрационного перемещения k_{Ax} представляет собой отношение эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения к радиусу тестового объекта круглой формы:

$$k_{Ax} = \frac{A_x}{r_t}. \quad (4)$$

По сути, это и есть эквивалентная амплитуда вибрационного перемещения, измеренная в единицах радиуса круглой метки.

Приведенная погрешность средства измерений, представляет собой отношение погрешности средства измерений к нормирующему значению величины, выраженную обычно в процентах¹:

$$\Delta A_x = \frac{\gamma_{Ax}}{N} 100 \%, \quad (5)$$

где ΔA_x – предельная абсолютная погрешность измерения эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения; N – нормирующее значение измеряемой величины.

На рис. 3 γ_{Ax} является методической приведенной погрешностью, т.е. в отличие от инструментальной приведенной погрешности, это погрешность, заложенная в самом методе. Эта погрешность возникает за счет пространственной дискретизации изображения, разбиения его на пиксели. Соотношения, примененные для построения графиков по рис. 3, получены математически [12]. В качестве нормирующего значения вибрационного перемещения принят радиус тестового объекта круглой формы. Из этого, принимая во внимание формулу (4), следует, что если аргументом функции этой погрешности является вибрационное перемещение k_{Ax} , измеренное в единицах радиуса круглой метки, то в качестве нормирующего значения измеряемой величины принимается единица. На графике по рис. 3 приведены четыре пронумерованных кривых, каждая из которых характеризуется своей константой опорного значения

¹ РМГ 29–2013. Государственная система обеспечения единства измерений.

площади изображения круглой метки S_{im0} . Площадь изображения измеряется количеством пикселей, это изображение составляющих. Если, например, опорное значение площади изображения круглой метки $S_{im0} = 10^6$ pix, радиус круглой метки 1 мм, то при эквивалентной амплитуде вибрационного перемещения $A_x \leq 1000$ мкм методическая приведенная погрешность $\gamma_{Ax} \approx 0,1$ % (рис. 3). Из формулы (5) следует, что

$$\Delta A_x = \frac{\gamma_{Ax} N}{100 \%}. \quad (6)$$

В рассматриваемом числовом примере:

$$\Delta A_x = \frac{\gamma_{Ax} N}{100 \%} = \frac{0,1 \% \cdot 1000 \text{ мкм}}{100 \%} = 1 \text{ мкм}.$$

Если радиус круглой метки составляет 1 мм, а система отрегулирована так, что опорное значение площади изображения круглой метки составляет 10^6 pix, то в диапазоне эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения от нуля до 1000 мкм предельная абсолютная погрешность измеряемой величины составляет 1 мкм.

При $k_{Ax} > 1$, как следует из рис. 3, погрешность резко возрастает. Это связано с увеличением доли прямоугольного фрагмента следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Поэтому не рекомендуется производить измерения при превышении эквивалентной амплитудой вибрационного перемещения радиуса изображения круглой метки. Диапазон измеряемой величины регулируется радиусом изображения круглой метки. В результате прибор становится многопредельным. Значение радиуса круглой метки располагается в конце шкалы. Это значение является нормирующим. Как правило, в качестве нормирующего значения измеряемой величины принимают как раз максимальное значение диапазона измерений или разность между максимальным и минимальным значениями диапазона измерений¹.

Если при этом регистрируются не просто опорное и контрольное изображения круглой метки, а опорный и контрольный видеопотоки объемом, например, 100 изображений каждый, а в качестве значений площади изображения круглой метки принимаются средние значения этой величины по видеопотоку, то в соответствии с законом «корень из N » приведенная погрешность измерений снизится в десять раз и составит 0,01 %. Тогда в рассматриваемом числовом примере предельная абсолютная методическая погрешность составит 0,1 мкм.

Для сравнения, контактный виброметр *BALTECH VP-3470-Ex* [13], который в настоящее время весьма популярен среди практиков вибрационной диагностики, имеет диапазон измерений размаха вибрационного перемещения на базовой частоте 79,6 Гц от 1 до 1000 мкм. Это только один диапазон без возможности переключения пределов измерений. Паспортный диапазон частот измеряемого вибрационного перемещения этого прибора от 10 до 1000 Гц. Диапазон частот измеряемой вибрации на основе анализа изображения тестового объекта круглой формы с вибрационным размытием верхнего предела практически не имеет. Кроме того, данный контактный виброметр измеряет не эквивалентную амплитуду вибрационного перемещения, а размах только одной проекции траектории этого перемещения. В результате значение, принимаемое за размах вибрационного перемещения, может быть сильно занижено, вплоть до обнуления [14]. Это явление отсутствует при измерении вибрации на основе анализа изображения тестового объекта круглой формы с вибрационным размытием.

Заключение

В статье обоснована актуальность проблемы совершенствования методов измерения параметров вибрации. Проведен анализ состояния вопроса. Изложен принцип оценивания интенсивности вибрационного сигнала, в котором реальное вибрационное перемещение по сложной траектории замещается прямолинейным гармоническим перемещением в плоскости объекта. Амплитуда этого заместительного вибрационного процесса должна быть такой, чтобы вибрационное приращение площади изображения круглой метки статистически значимо не отличалось от того же параметра реального исследуемого процесса. Приведена схема измерения параметров механических колебаний на основе анализа изображения круглой метки с вибрационным размытием. Приведена модель формирования такого изображения при эквива-

¹ РМГ 29–2013. Государственная система обеспечения единства измерений.

лентном прямолинейном гармоническом вибрационном перемещении ее оригинала в плоскости объекта. Представлено описание метода оценки погрешности измерения интенсивности вибрации. Представлено семейство кривых, отражающих приведенную погрешность измерения эквивалентной амплитуды вибрационного перемещения как функцию истинного значения этой величины, измеренной в единицах радиуса круглой метки, при различных значениях площади изображения этой метки. На числовых примерах проиллюстрирована методика оценки абсолютной погрешности измерений. Показано, что прибор, основанный на предлагаемом в статье методе, является многопредельным, а переключателем пределов измерений служит радиус круглой метки. Проведен сравнительный анализ метрологических характеристик метода, представленного в статье, и процесса измерения вибраций контактным виброметром *BALTECH VP-3470-Ex*.

Список литературы

1. Козлов А. Ю., Сидоров А. И. Вероятностно-временная модель функционирования иерархической системы управления разнородными территориально распределенными объектами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 99–112. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-9
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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 ; опубл. 28.01.2022, Бюл. № 4.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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. P. 736–742.
11. Нуржанов Д. Х., Григорьев А. В., Трусов В. А. [и др.]. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 2. С. 14–16.
12. Grigoriev A. V., Yurkov N. K., Kochegarov I. I. Contactless Measurement Technique for the Amplitude of Vibrational Movement of the Test Material Point // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016). 2016. P. 549–551.
13. Виброметр-балансирующий *BALTECH VP-3470-Ex*. Руководство по эксплуатации. URL: <http://vibropoint.ru/wp-content/uploads/yootheme/demo/default/PDF/instruction.pdf?ysclid=16kwq3u6sj198635102> (дата обращения: 08.08.2022).
14. Кобяков И., Сперанский А., Хориков А. [и др.]. Знание векторных характеристик вибрации – ключ к безопасности технических устройств // Двигатель. 2005. № 2. С. 4.

References

1. Kozlov A.Yu., Sidorov A.I. Probabilistic-temporal model of the functioning of a hierarchical management system of heterogeneous geographically distributed objects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Izvestia of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2021;(2):99–112. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-9

2. 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.
3. 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.)
4. 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.)
5. 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.)
6. 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.)
7. 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.)
8. 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.)
9. 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.
10. Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. et al. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring mechanisms. *Procedia Computer Science*. 2021:736–742.
11. Nurzhanov D.Kh., Grigor'ev A.V., Trusov V.A. et al. Analysis of blurring of the image of a round mark during reciprocating vibrational displacement of the investigated material dots. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;2:14–16. (In Russ.)
12. Grigor'ev A.V., Yurkov N.K., Kochegarov I.I. Contactless Measurement Technique for the Amplitude of Vibrational Movement of the Test Material Point. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*. 2016:549–551.
13. *Vibrometr-balansirovshchik BALTECH VP-3470-Ex. Rukovodstvo po ekspluatatsii = BALTECH VP-3470-Ex Vibration balancer. Operation manual*. (In Russ.). Available at: <http://vibropoint.ru/wp-content/uploads/yootheme/demo/default/PDF/instruction.pdf?ysclid=16kwq3u6sj198635102> (accessed 08.08.2022).
14. Kobayakov I., Speranskiy A., Khorikov A. et al. Knowledge of the vector characteristics of vibration is the key to the safety of technical devices. *Dvigatel' = Engine*. 2005;(2):4. (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)

**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

УДК 621.317.7.089.68
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-4

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОВЕРКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А. С. Ильин¹, И. М. Рыбаков², А. В. Лысенко³, Н. К. Юрков⁴

¹ Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия
^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ aalexeiil@mail.ru, ² rybakov_im@mail.ru, ³ lysenko_av@bk.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность информационно-измерительной системы (ИИС) поверки киловольтметров с автоматизированным режимом работы определяется необходимостью в короткий срок проводить поверку большого объема первичных высоковольтных преобразователей и средств измерения (СИ) высокого напряжения, используемых в автоматических системах контроля высокого напряжения. Целью работы является ознакомление с современным состоянием и новой автоматизированной ИИС поверки киловольтметров. *Материалы и методы.* Метод сличения с образцовым СИ. *Результаты.* Приведен обзор различных ИИС поверки и программного обеспечения. Предложена современная автоматизированная ИИС поверки киловольтметров. *Выводы.* Обзор позволил выделить преимущество перед имеющимися системами новой ИИС поверки киловольтметров, позволяющей оперативно работать с высоковольтными СИ.

Ключевые слова: высокое напряжение, поверка, измерительная система, программное обеспечение, автоматизация

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

Для цитирования: Ильин А. С., Рыбаков И. М., Лысенко А. В., Юрков Н. К. Современное состояние информационно-измерительных систем поверки преобразователей высокого напряжения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 31–36. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-4

THE PRESENT STATE OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEMS FOR CHECKING HIGH VOLTAGE CONVERTERS

A.S. Ilin¹, I.M. Rybakov², A.V. Lysenko³, N.K. Yurkov⁴

¹ Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia
^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ aalexeiil@mail.ru, ² rybakov_im@mail.ru, ³ lysenko_av@bk.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the information-measuring system (IMS) for verification of kilovoltmeters with an automated mode of operation is determined by the need to quickly verify a large volume of primary high-voltage converters and high-voltage measuring instruments (SI) used in automatic high-voltage control systems. The purpose of the work is to familiarize with the current state and the new automated IMS for checking kilovoltmeters. *Materials and methods.* Method of comparison with exemplary SI. *Results.* An overview of various verification IMS and software (SW) is given. A modern automated IMS for checking kilovoltmeters is proposed. *Conclusions.* The review made it possible to single out the advantage over the existing systems of the new IMS for checking kilovoltmeters, which makes it possible to work quickly with high-voltage measuring instruments.

Keywords: high voltage, verification, measuring system, software, automation

Acknowledgements: the research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

For citation: Ilin A.S., Rybakov I.M., Lysenko A.V., Yurkov N.K. The present state of the information-measuring systems for checking high voltage converters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):31–36. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-4

Развитие таких разнообразных областей, как наука, промышленность, здравоохранение, аналитическое приборостроение, полупроводниковая промышленность, телекоммуникации, контроль и безопасность, не обходится без применения высоких напряжений. Рост объема первичных высоковольтных преобразователей и СИ, используемых в автоматических системах контроля высокого напряжения, вызывает необходимость быстрого процесса их поверки [1]. Для поверки высоковольтных СИ применяются специальные ИИС поверки киловольтметров. Увеличение скорости поверки может быть достигнуто автоматизацией режима работы, благодаря имеющимся в высоковольтных СИ интерфейсов для коммутации с различными системами управления и контроля (например, встроенный в вольтметр В7-40 интерфейс позволяет использовать его в составе автоматизированных ИИС).

Существующие установки поверки и калибровки киловольтметров УПК-100 и У-400 своими характеристиками удовлетворяют необходимую потребность [2]. Однако имеющийся ручной режим требует большое количество операций и длительный процесс поверки и не позволяет работать с большим количеством высоковольтных СИ в короткие сроки. Кроме того, ручной режим ввиду отсутствия синхронизации процесса работы вносит погрешность измерения, именуемую как погрешность оператора.

Ускорить процесс поверки позволяет специальное ПО, автоматически выполняющее множество операций и имеющее синхронизацию измерений.

Так, программное обеспечение (ПО) UNITESS APM (рис. 1) предназначено для поверки и калибровки киловольтметров и измерительных систем высокого напряжения с возможностью подключения персонального компьютера (ПК) к оборудованию посредством любого из стандартных интерфейсов [3].

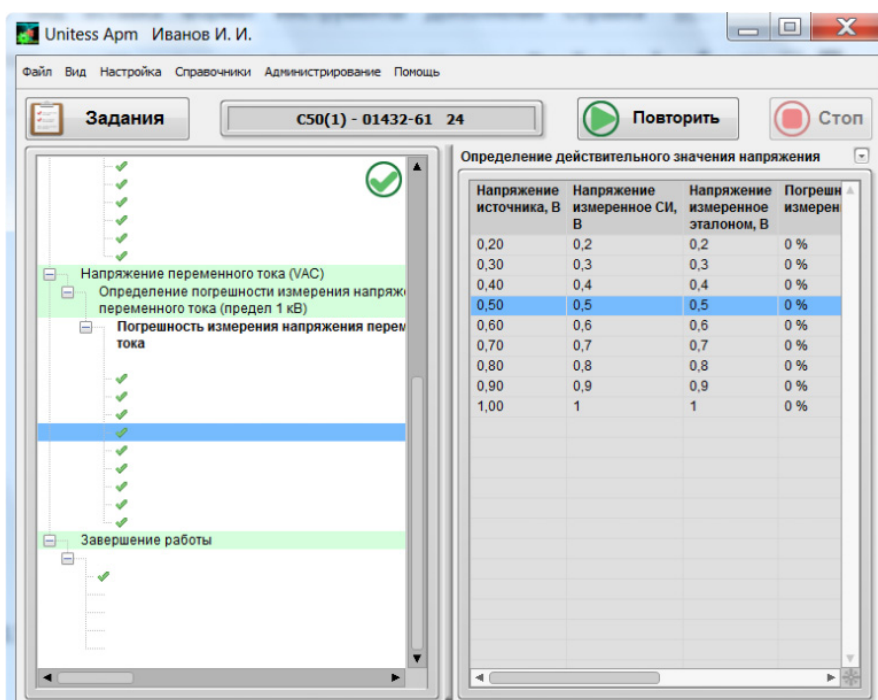


Рис. 1. Внешний вид рабочего окна программы UNITESS APM

Алгоритм работы, соответствующий определенной методике поверки, управляет приборами. Согласно программе, источник подает на вход эталона и СИ электрические сигналы с определенными параметрами. Оператор считывает показания средства измерения и вводит их в диалоговом режиме.

Для осуществления автоматизации АРМ выполняет математические расчеты. ПО АРМ выполняет проверку на соответствие допустимым предельным значениям. Результаты поверки отображаются в специальном блоке рабочей программы. Оформление протокола поверки/калибровки киловольтметров и измерительных систем высокого напряжения осуществляется в диалоговом режиме.

Объединение аппаратной и программной части представлено в известном комплексе средств поверки цифровых электронных трансформаторов тока и напряжения КЭТ-61850, производства фирмы ООО «НПП Марс-Энерго» (г. С.-Петербург). Комплекс предназначен для калибровки и поверки электронных трансформаторов напряжения с применением ПО [4].

Комплекс представляет систему с источником высокого напряжения, образцовым, поверяемым оборудованием и ПК. На рис. 2 изображена схема соединений КЭТ-61850.

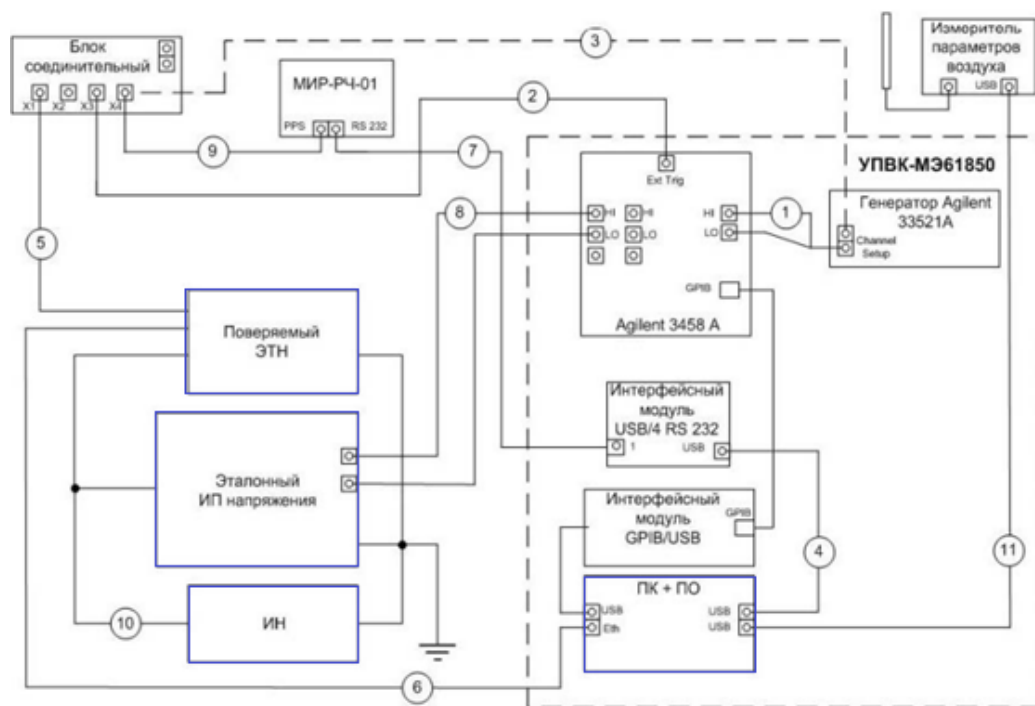


Рис. 2. Схема соединений КЭТ-61850 для калибровки и поверки ЭлТН

Управление источником напряжения (ИН) производится вручную, установкой требуемого значения напряжения. Имеющееся в составе ПО производит только измерение и обработку параметров поверяемого трансформатора и эталонного измерительного преобразователя напряжения (рис. 3).

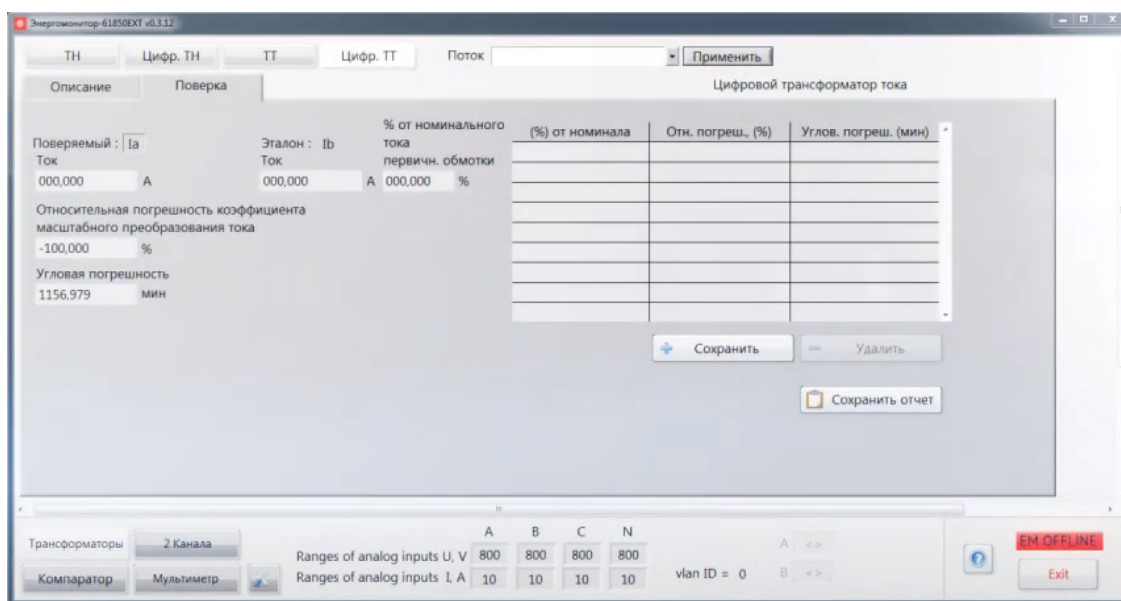


Рис. 3. Рабочее окно ПО КЭТ-61850

Программный код выполняет метрологически значимые операции и вычисления, а также контролирует значения поправочных множителей и поправок, которые учитываются при вычислении результатов измерений и определяются при регулировке или поверке [5].

Связь приборов комплекса с ПК осуществляется интерфейсами Ethernet, RS-232 и интерфейсным модулем USB [6]. Для работы в автоматическом режиме поверяемое оборудование должно иметь свой интерфейс.

Синхронизация системы измерений происходит системой PPS (один импульс в секунду) от радиочасов [7]. Тактовый сигнал PPS используется для хронометража и подключения к ПК, поэтому указывает только начало секунды.

Следует заметить, что такая система синхронизации требует отдельной линии связи, ретрансляторов и больших затрат.

Кроме того, КЭТ-61850, имеющий ПО для синхронизации процесса измерений, не является полностью автоматизированным ввиду отсутствия автоматического управления источником высокого напряжения.

Обзор существующих систем, их особенностей и недостатков позволил реализовать новую автоматизированную ИИС поверки киловольтметров для постоянного тока, представляющую собой трехканальную систему воспроизведения и измерения высокого напряжения (до 30 кВ) под управлением ПК [8].

Система имеет источник, воспроизводящий высокое напряжение, задаваемое ПК, образцовый киловольтметр, преобразующий и измеряющий воспроизводимое напряжение, и ПК, формирующий временной процесс работы системы, и обрабатывающий полученные данные. Дополнительно подключается поверяемый киловольтметр [9].

Особенностью ИИС в автоматизированном режиме с использованием ПК является возможность подключения различных измерителей напряжений, режимы поверки которых установлены в НТД на поверяемые СИ.

ПО позволяет устанавливать соотношения интервалов запуска высокого напряжения и синхронного измерения в определенный момент времени в каналах 2 и 3, повышая точность системы.

Алгоритм работы программы управления ИИС и рабочее окно управляющей программы подробно представлены в работе [10].

Заключение

Учитывая большое количество применяемых высоковольтных СИ, следует отметить преимущество новой автоматизированной ИИС поверки киловольтметров постоянного тока, позволяющей в короткий срок проводить поверку.

Положительные результаты работы над ИИС закладывают основу для реализации автоматизированной измерительной системы с рабочими напряжениями свыше 100 кВ.

Список литературы

1. Hauschild W., Lemke E. High-Voltage Test and Measuring Techniques. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2014. doi:10.1007/978-3-642-45352-6
2. Установки для поверки на постоянном токе электростатических киловольтметров УПК-100. Госреестр № 5481-76. Справочник измерительного оборудования. URL: <http://www.kip-guide.ru/info/5481-76>
3. ПО Unities // Главная – решения – поверка и калибровка – электроизмерения – поверка и калибровка киловольтметров и измерительных систем высокого напряжения. URL: <https://unites.ru/solution/poverka-i-kalibrovka-kilovoltmetrovo-i-izmeritelnyh-sistem-vysokogo-napryazheniya.html>
4. КЭТ 61850 // Марс-Энерго. Главная – метрологическое обеспечение цифровых подстанций. URL: <https://www.mars-energo.ru/home/metrologicheskoe-obespechenie-cps/kompleks-sredstv-poverki-elektronnykh-transformatorov-toka-i-napryazheniya-ksp-61850.html>
5. Комплексы средств поверки цифровых электронных трансформаторов тока и напряжения «КЭТ-61850». Руководство по эксплуатации МС2.706.500 РЭ.
6. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. СПб. : Питер, 2002.
7. Ингрэм Д., Смелли Б. Реализация систем синхронизации времени на основе протокола РТР // Цифровая подстанция. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2015/04/21>

8. Установка для поверки киловольтметров УПК-30ПТ. Описание типа СИ. Номер в ГРСИ РФ: 77593-20. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1140753>
9. Ильин А. С., Кострикина И. А., Воронов А. П., Плаксунов Р. Ф. Установка для поверки киловольтметров УПК-30ПТ // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 4. С. 44–50. doi:10.21685/2307-5538-2020-4-5
10. Ильин А. С., Юрков Н. К., Баннов В. Я. [и др.]. Алгоритм работы установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 2. С. 303–305.

References

1. Hauschild W., Lemke E. *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. doi:10.1007/978-3-642-45352-6
2. *Ustanovki dlya poverki na postoyannom toke elektrosticheskikh kilovol'tmetrov UPK-100. Gosreestr № 5481-76. Spravochnik izmeritel'nogo oborudovaniya = Installations for direct current calibration of electrostatic kilovoltmeters UPK-100. State aetr No. 5481-76. Reference list of measuring equipment.* (In Russ.). Available at: <http://www.kip-guide.ru/info/5481-76>
3. PO Unities. *Glavnaya – resheniya – poverka i kalibrovka – elektroizmereniya – poverka i kalibrovka kilovol'tmetrov i izmeritel'nykh sistem vysokogo napryazheniya = Home – solutions – verification and calibration – electrical measurements – verification and calibration of kilovoltmeters and high voltage measuring systems.* (In Russ.). Available at: <https://unitess.ru/solution/poverka-i-kalibrovka-kilovol'tmetrov-i-izmeritel'nykh-sistem-vysokogo-napryazheniya.html>
4. KET-61850. *Mars-Energo. Glavnaya – metrologicheskoe obespechenie tsifrovyykh podstantsiy = Mars-Energo. The main one is metrological support of digital substations.* (In Russ.). Available at: <https://www.mars-energo.ru/home/metrologicheskoe-obespechenie-cps/kompleks-sredstv-poverki-elektronnykh-transformatorov-toka-i-napryazheniya-ksp-61850.html>
5. Complexes of means of verification of digital electronic current and voltage transformers "KET-61850". Operating Manual MS2.706.500 RE. (In Russ.)
6. Guk M. *Apparatnye interfeysy PK = PC hardware interfaces*. Saint Petersburg: Piter, 2002. (In Russ.)
7. Ingrem D., Smelli B. Implementation of time synchronization systems based on the PTP protocol. *Tsifrovaya podstantsiya = Digital substation.* (In Russ.). Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2015/04/21>
8. *Ustanovka dlya poverki kilovol'tmetrov UPK-30PT. Opisaniye tipa SI. Nomer v GRSI RF: 77593-20 = Installation for checking kilovoltmeters UPK-30PT. Description of the SI type. Number in the GRSI of the RF: 77593-20.* (In Russ.). Available at: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1140753>
9. Il'in A.S., Kostrikin I.A., Voronov A.P., Plaksunov R.F. Installation for checking kilovolt meters of the UPK-30PT. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2020;(4):44–50. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2020-4-5
10. Il'in A.S., Yurkov N.K., Bannov V.Ya. et al. he algorithm of the unit for checking kilovoltmeters UPK-30PT. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2020;2:303–305. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Сергеевич Ильин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: aalexeiil@mail.ru

Aleksey S. Ilin

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
head of laboratory,
Scientific Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Илья Михайлович Рыбаков

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

Ilya M. Rybakov

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

Алексей Владимирович Лысенко

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

Aleksey V. Lysenko

Candidate of technical sciences,
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)

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

Поступила в редакцию/Received 13.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 14.06.2022

Принята к публикации/Accepted 19.07.2022

УДК 621.311.019.3
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-5

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В. А. Листюхин¹, Е. А. Печерская²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹vladyan4iklist@yandex.ru, ²pea1@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В результате анализа научных исследований и статистических данных показано, что актуальной задачей электросетевого комплекса РФ является повышение надежности распределительных электрических сетей и качества услуг, оказываемых потребителям. Настоящие задачи реализуются путем разработки и внедрения информационно-измерительных систем. *Материалы и методы.* Представлены результаты разработки информационно-измерительной системы для исследования оперативных режимов работы воздушных линий электропередачи. *Результаты.* Разработаны макет воздушной линии электропередачи и информационно-измерительная система для исследования оперативных режимов работы воздушных линий электропередачи. Проведена проверка работоспособности информационно-измерительной системы в трех оперативных режимах и при различных значениях температуры окружающего воздуха. *Выводы.* Доказаны актуальность и необходимость контроля параметров воздушных линий электропередачи посредством информационно-измерительных систем. Внедрение в промышленную эксплуатацию данной системы позволит электросетевым организациям решить ряд производственных задач по обеспечению надежного электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, информационно-измерительная система, электроэнергетические системы и сети, надежность

Для цитирования: Листюхин В. А., Печерская Е. А. Разработка информационно-измерительной системы для исследования оперативных режимов работы воздушных линий электропередач // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 37–42. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-5

DEVELOPMENT OF INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR INVESTIGATION OF OPERATING MODES OF OVERHEAD POWER LINES

V.A. Listyukhin¹, E.A. Pecherskaya²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia
¹vladyan4iklist@yandex.ru, ²pea1@list.ru

Abstract. *Background.* As a result of the analysis of scientific research and statistical data, it is shown that the actual task of the power grid complex of the Russian Federation is to increase the reliability of distribution electrical networks and the quality of services provided to consumers. These tasks are realized through the development and implementation of information-measuring systems. *Materials and methods.* The results of the development of an information-measuring system for the study of operational modes of operation of overhead power lines are presented. *Results.* A stand-model of an overhead power line and an information-measuring system for studying the operational modes of operation of overhead power lines have been developed. The operability of the information-measuring system was tested in three operational modes and at various ambient temperatures. *Conclusions.* The relevance and necessity of monitoring the parameters of overhead power lines by means of information-measuring systems is proved. The introduction of this system into commercial operation will allow power grid organizations to solve a number of production tasks to ensure reliable power supply to consumers.

Keywords: overhead power lines, information-measuring system, electric power systems and networks, reliability

For citation: Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A. Development of information-measuring system for investigation of operating modes of overhead power lines. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):37–42. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-5

Введение

Современные темпы развития науки и технологий позволяют сформировать условия для устойчивого функционирования электрических сетей. Сетевые компании внедряют на свои объекты современные виды оборудования, элементы, устройства, которые обладают высокими технико-экономическими показателями. Также сегодня в ряде регионов РФ наблюдается тенденция к увеличению объемов потребления электроэнергии [1, 2]. Рост потребляемой электроэнергии обусловлен развитием производственной и социальной инфраструктуры. Так, например, в ряде районов Пензенской области ведется активное строительство предприятий сельскохозяйственного сектора. Развитие инфраструктуры региона требует не только развития систем электроснабжения, но и обеспечения их надежности. Основная часть эксплуатируемого оборудования распределительных электрических сетей имеет высокий уровень износа [3–4], чем в свою очередь снижается гарантия надежного электроснабжения потребителей со стороны сетевых организаций. Из анализа причин технологических нарушений (аварий), представленного в работе [5], видно, что основными причинами аварий в электрических сетях (в основном на воздушных линиях электропередачи (ВЛ)) являются:

- несвоевременное выявление дефектов (44 % от общего числа аварий);
- неудовлетворительное техническое состояние оборудования (23 % от общего числа аварий);
- воздействие неблагоприятных природных явлений (31 % от общего числа аварий).

Технологические нарушения (аварии) на ВЛ сопровождаются снижением показателей качества оказываемых потребителям услуг по передаче электрической энергии, что в свою очередь негативно отражается на прибыли и имидже сетевой организации.

Разработка информационно-измерительной системы для исследования оперативных режимов работы ВЛ

Для решения задачи обеспечения надежного электроснабжения потребителей, достижения высоких технико-экономических показателей качества оказываемых услуг электросетевыми организациями авторами предлагается разработка информационно-измерительной системы контроля параметров воздушных линий электропередачи [6].

Авторами разработан стенд-макет воздушной линии электропередачи 0,4 кВ с целью экспериментального исследования и систематизации причинно-следственных факторов режимов работы ВЛ. На рис. 1 представлен общий вид стенда для исследования оперативных режимов работы ВЛ.



Рис. 1. Общий вид стенда-макета для исследования оперативных режимов работы ВЛ

В ходе выполнения работы была разработана информационно-измерительная система для исследования оперативных режимов работы ВЛ (ИИС). Структурная схема испытательной ИИС представлена на рис. 2.

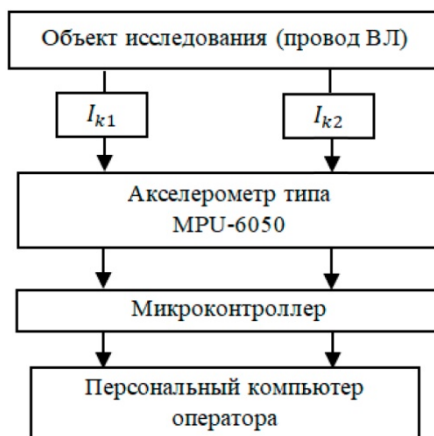


Рис. 2. Структурная схема ИИС: I_{k1} – канал измерения положения провода в пространстве относительно осей X, Y, Z ; I_{k2} – канал измерения температуры окружающего воздуха, °С

Принцип работы ИИС заключается в следующем: на провод ВЛ фиксируется 3-осевой акселерометр типа MPU-6050 (метрологические характеристики представлены в табл. 1), который контролирует положение провода в пространстве относительно осей X, Y, Z и температуру окружающего воздуха в °С (соответственно, температуру окружающего воздуха в зоне прохождения трасы ВЛ). Данные с акселерометра передаются в микроконтроллер, в последующем результаты измерений через USB-порт выводятся на экран персонального компьютера оператора. В ходе выполнения работы была реализована программа для отображения результатов работы ИИС. В дальнейшем планируется реализовать данную программу как автоматизированное рабочее место (АРМ) оперативного персонала электроэнергетической компании. Общий вид рабочего окна программы представлен на рис. 3.

Таблица 1

Метрологические характеристики акселерометра типа MPU-6050

Наименование характеристики	Диапазон	Единица измерения
Напряжение питания	3,7 – 5,5	В
Потребляемый ток	≤10	мА
Максимальная частота интерфейса I2C	400	кГц
Диапазон гироскопа	±250 – ±2000	Град./с
Диапазон акселерометра	±2, ±4, ±8 и ±16	g
Вывод данных	16	бит
Резонансная частота	27	кГц
Расстояние между контактами	2,54	мм
Размер	20 × 16	мм

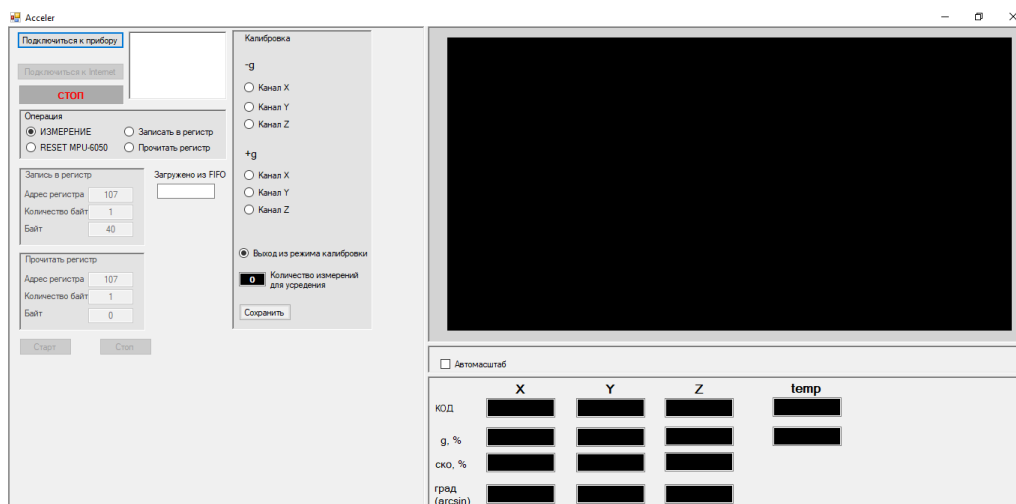


Рис. 3. Общий вид рабочего окна программы

Проверка работоспособности информационно-измерительной системы

Положение провода ВЛ может находиться в следующих оперативных режимах:

- нормальный режим работы (угол наклона провода находится в пределах согласно требованиям действующих нормативно-технических документов);
- предаварийный режим работы (угол наклона провода превышает допустимые значения, но не приводит к падению на землю и не представляет угрозы для жизни и здоровья людей и животных);
- аварийный режим работы (угол наклона провода критически превышает допустимые значения, что свидетельствует о наличии угрозы жизни и здоровью людей и животных либо зафиксировано отключение ВЛ действием устройств релейной защиты и автоматики).

Проводилась проверка работоспособности ИИС в вышеуказанных оперативных режимах. На рис. 4 представлены результаты работы ИИС в нормальном режиме работы ВЛ.

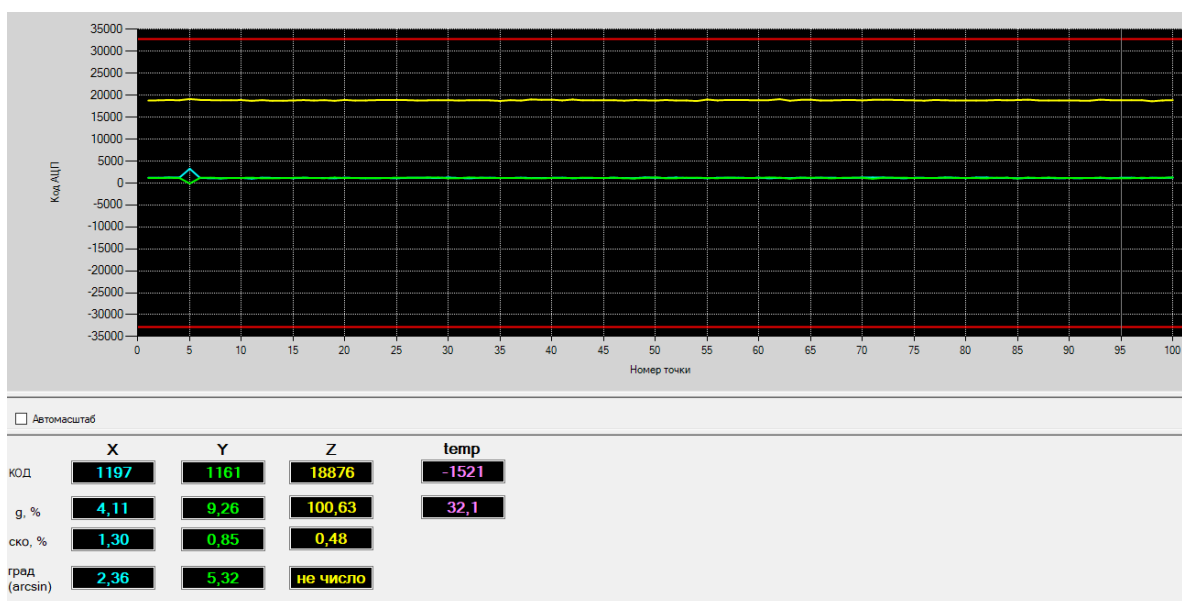


Рис. 4. Результаты работы ИИС в нормальном режиме работы ВЛ

На рис. 5 представлены результаты работы ИИС в предаварийном режиме работы ВЛ.

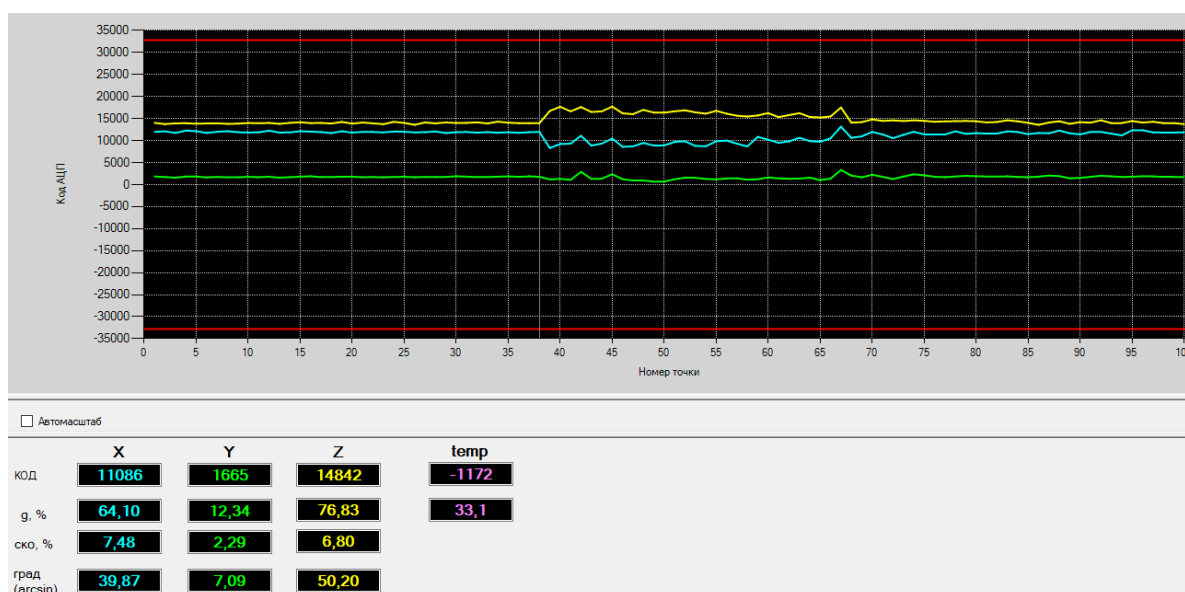


Рис. 5. Результаты работы ИИС в предаварийном режиме работы ВЛ

На рис. 6 представлены результаты работы ИИС в аварийном режиме работы ВЛ.

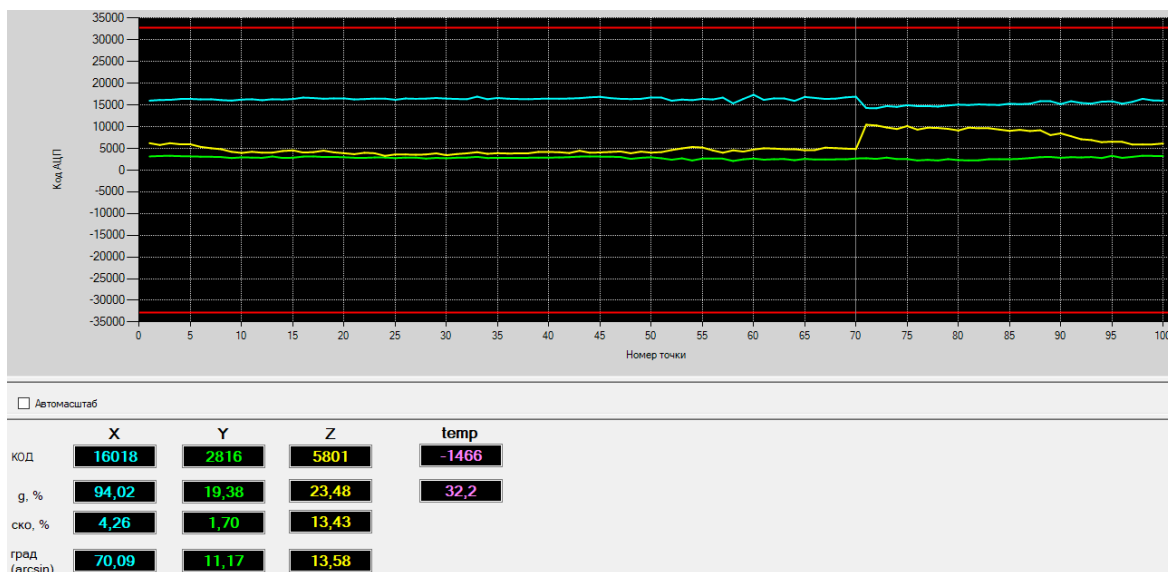


Рис. 6. Результаты работы ИИС в аварийном режиме работы ВЛ

Осуществлена проверка работоспособности ИИС при различных значениях температуры окружающего воздуха (от -9 °С до +32 °С). Результаты проверки работоспособности ИИС при различных значениях температуры окружающего воздуха представлены на рис. 7.

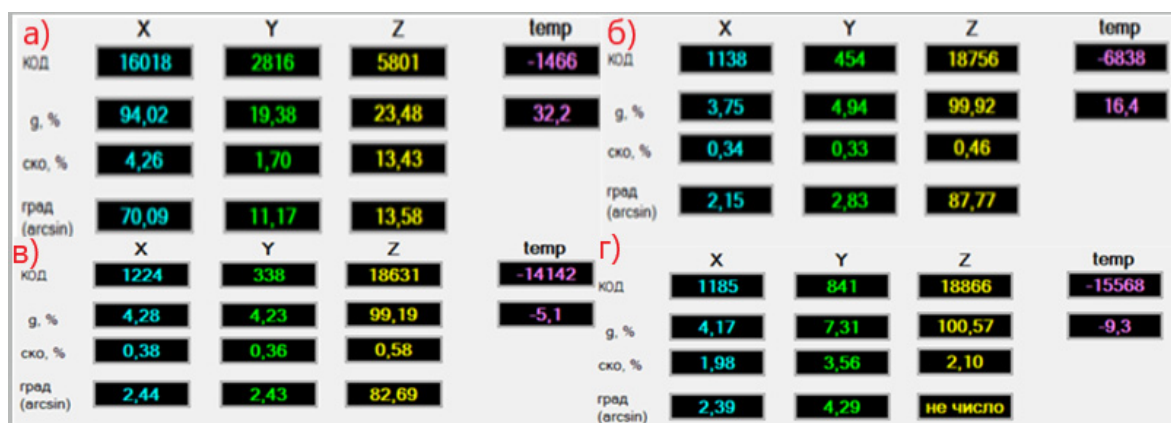


Рис. 7. Результаты проверки работоспособности ИИС при различных значениях температуры окружающего воздуха: а – показания при температуре +32,2 °С; б – показания при температуре +16,4 °С; в – показания при температуре -5,1 °С; г – показания при температуре -9,3 °С

Заключение

Снижение числа аварий на воздушных линиях электропередачи распределительных электрических сетей является приоритетной задачей электроэнергетики, которая в свою очередь может быть решена путем внедрения информационно-измерительных систем мониторинга и контроля их эксплуатационных параметров. Систематизация результатов исследования оперативных режимов работы ВЛ позволит разработать базу данных для ИИС, реализация которой поможет электросетевым организациям решить ряд производственных задач, а именно:

- повышение эффективности эксплуатации оборудования за счет дополнения системы планово-предупредительных ремонтов системами online мониторинга;
- снижение риска травматизма производственного персонала при обслуживании ВЛ за счет локализации зоны определения места повреждения.
- сокращение времени поиска места повреждения;
- сокращение времени проведения аварийно-восстановительных работ при ликвидации аварий и ненормальных режимов.

Список литературы

1. Khlebtsov A. P., Zaynutdinova L. K., Shilin A. N. Research into the current state of accident rate of electric networks in agriculture using the example of Astrakhan region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 723, № 5. P. 052015.
2. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю., Пухова А. И. Автоматизация измерений параметров режима работы проводов линий электропередачи при исследовании процесса нагрева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 53–60. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-7.
3. Новиков А. А., Эльбакян А. М. Повышение инвестиционной привлекательности электроэнергетической отрасли Российской Федерации // Экономические науки. 2016. № 143. С. 29–34.
4. Абдулминов М., Емельянова В. А. ЧС в электроэнергетических системах // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в техносфере и защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях : сб. науч. тр. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. Ставрополь, 2021. С. 187–190.
5. Listyuhin V. A., Pecherskaya E. A., Timokhina O. A., Smogunov V. V. System for monitoring the parameters of overhead power lines // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2086.
6. 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.

References

1. Khlebtsov A.P., Zaynutdinova L.K., Shilin A.N. Research into the current state of accident rate of electric networks in agriculture using the example of Astrakhan region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;723(5):052015.
2. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Tryapkin E.Yu., Pukhova A.I. Automation of measurements of operating mode parameters of power transmission line wires in the study of the heating process. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2022;(2):53–60. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-7.
3. Novikov A.A., El'bakyan A.M. Increasing the investment attractiveness of the electric power industry of the Russian Federation. *Ekonomicheskie nauki = Economic sciences*. 2016;143:29–34. (In Russ.)
4. Abdulminov M., Emel'yanova V.A. Emergencies in electric power systems. *Aktual'nye problemy obespecheniya bezopasnosti v tekhnosfere i zashchity naseleniya i territoriy v chrezvychaynykh situatsiyakh : sb. nauch. tr. po materialam Vseros. nauch.-prakt. konf. = Actual problems of safety in the technosphere and protection of the population and territories in emergency situations: collection of scientific tr. based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Stavropol', 2021:187–190. (In Russ.)
5. Listyuhin V.A., Pecherskaya E.A., Timokhina O.A., Smogunov V.V. System for monitoring the parameters of overhead power lines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2086.
6. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A. Real-time monitoring system of parameters of overhead power transmission lines. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(4):90–95. (In Russ.)

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)

**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

УДК 681.518.3
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-6

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ТЕХНОСФЕРЫ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА

О. Е. Безбородова

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для обоснованного выбора природоохранных и лечебно-профилактических мероприятий с целью обеспечения экологического благополучия человека необходимы моделирование и прогнозирование изменения состояния территориальной техносферы в результате техногенного воздействия. Эти процессы должны быть обеспечены техническими и информационными ресурсами, позволяющими точно и достоверно сделать прогноз. Автором предложена упрощенная схема информационно-измерительной и управляющей системы обеспечения экологического благополучия человека, позволяющая получать и обрабатывать данные о состоянии элементов территориальной техносферы (человека, окружающей среды, объекта техносферы) и на их основе делать прогноз об изменении экологического благополучия человека. Прогнозирование предложено проводить на основе усовершенствованной модели Лотки – Вольтерры. Целью данной работы является оценка точности и достоверности результатов и корректности использования модели Лотки – Вольтерры для моделирования и прогнозирования экологического благополучия человека. *Материалы и методы.* Для оценки точности и достоверности моделирования и прогнозирования экологического благополучия человека использован метод аппроксимации кубическими сплайнами. *Результаты.* Рассчитанные коэффициенты корреляции и детерминации свидетельствуют о наличии сильной (высокой) связи между исследуемыми величинами, а средняя ошибка аппроксимации подтверждает, что модель аппроксимации кубическими сплайнами выбрана правильно, корректно описывает связь между исследуемыми величинами и позволяет обеспечить точность прогноза. *Вывод.* Таким образом, проведенное исследование показало корректность использования модели Лотки – Вольтерры для моделирования и прогнозирования экологического благополучия человека.

Ключевые слова: точность и достоверность, информационно-измерительная и управляющая система, экологическое благополучие человека, моделирование и прогнозирование состояния территориальной техносферы

Для цитирования: Безбородова О. Е. Оценка точности прогнозирования состояния территориальной техносферы в информационно-измерительной и управляющей системе обеспечения экологического благополучия человека // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 43–50. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-6

ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF FORECASTING THE STATE OF THE TERRITORIAL TECHNOSPHERE IN THE INFORMATION-MEASURING AND MANAGEMENT SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL WELFARE OF HUMANS

O.E. Bezborodova

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

Abstract. *Background.* For a reasonable choice of environmental and therapeutic and preventive measures in order to ensure the ecological well-being of a person, it is necessary to model and predict changes in the state of the territorial technosphere as a result of technogenic impact. These processes must be provided with technical and information resources that allow accurate and reliable forecasting. The author proposes a simplified scheme of the information-measuring and control system for ensuring the ecological well-being of a person, which allows receiving and processing data on the state of the elements of the territorial technosphere (a person, the environment, an object of the techno-

sphere) and, based on them, making a forecast about a change in the ecological well-being of a person. Forecasting is proposed to be carried out on the basis of an improved Lotka – Volterra model. The purpose of this work is to evaluate the accuracy and reliability of the results and the correctness of using the Lotka-Volterra model for modeling and predicting the ecological well-being of a person. *Materials and methods.* To assess the accuracy and reliability of modeling and predicting the ecological well-being of a person, the cubic spline approximation method was used. *Results.* The calculated correlation and determination coefficients indicate the presence of a strong (high) relationship between the studied quantities, and the average approximation error confirms that the cubic spline approximation model is chosen correctly, correctly describes the relationship between the studied quantities and ensures the accuracy of the forecast. *Conclusion.* Thus, the study showed the correctness of using the model Lotka – Volterra for modeling and predicting the ecological well-being of a person.

Keywords: accuracy and reliability, information-measuring and control system, ecological well-being of a person, modeling and forecasting the state of the territorial technosphere

For citation: Bezborodova O.E. Assessment of the accuracy of forecasting the state of the territorial technosphere in the information-measuring and management system for environmental welfare of humans. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):43–50. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-6

Постановка проблемы

От последствий развития промышленного производства во всем мире страдает качество окружающей среды и здоровье человека, и как следствие, возникает проблема обеспечения его экологического благополучия. Согласно оценкам Всемирной организации здравоохранения, ежегодно примерно 12 млн человек умирают вследствие проживания или работы в экологически неблагоприятных условиях – это почти четверть от общего числа умерших в мире [1]. Поэтому контроль качества среды обитания человека становится насущной проблемой, связанной с необходимостью обеспечения *точности и достоверности* измерения параметров состояния окружающей среды, функционального состояния организма человека и параметров функционирования объектов техносферы *для составления прогнозов изменения* экологического благополучия человека в территориальной техносфере.

Экологическое благополучие человека – это интегральный показатель, характеризующий функциональное состояние организма человека в территориальной техносфере, которое возможно при стремлении к нулю значений факторов опасности и обеспечении благоприятных условий жизнедеятельности человека. Оценка проводится по значениям рисков для каждого элемента территориальной техносферы – риска для здоровья человека, экологического и техногенного.

Данные, характеризующие экологическое благополучие человека, необходимо получать в масштабе реального времени для повышения эффективности и обоснованности при принятии градостроительных и производственно-хозяйственных решений в условиях территориальной техносферы и обоснованного назначения лечебно-профилактических мероприятий для отдельных групп населения, проживающего в данной территориальной техносфере.

Учитывая требования цифровой трансформации и интеллектуализации в области экологии и природопользования, следующие поколения информационно-измерительных и управляющих систем наряду с измерениями должны выполнять обработку и анализ данных¹. В частности, при обработке результатов измерений с помощью математических методов получать необходимые данные, а также показатели их точности и достоверности. Содержание и объем обработки и анализа данных могут различаться с учетом сферы их применения и зависеть от вида измерений, объема и свойств экспериментальных данных, наличия априорной и апостериорной информации, требований к точности и др.

Материалы и методы

Для обеспечения экологического благополучия человека в территориальной техносфере автором предложена интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система обеспечения экологического благополучия человека (рис. 1).

¹ Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования : распоряжение Правительства РФ № 3496-р от 08.12.2021.



Рис. 1. Упрощенная схема информационно-измерительной и управляющей системы обеспечения экологического благополучия человека

Эта система выполняет измерение и/или сбор параметров состояния окружающей среды, функционального состояния организма человека и параметров функционирования объектов техносферы, на основе которых производится моделирование состояний территориальной техносферы и делается прогноз изменения экологического благополучия человека. Моделирование и прогнозирование состояния территориальной техносферы по параметру «экологическое благополучие человека» в информационно-измерительной и управляющей системе осуществляется на основе значений факторов опасности, значения которых получены путем измерений и/или расчетов, используя усовершенствованную систему дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры [2].

Схема имитационной модели усовершенствованной системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры для прогнозирования состояния экологического благополучия человека для трех конкурирующих элементов приведена в работе [4]. Она позволяет комплексно оценить динамику процессов взаимодействия элементов, выйти на равновесные уровни исследуемых конкурирующих элементов и прогнозировать и управлять поведением основных параметров модели. Из-за сложности и нелинейности таких моделей автор использовал для моделирования пакет *MatLab/Simulink* для исследования динамики рисков в условиях конкуренции и для решения задачи управления рисками [3].

Точность и качество прогноза экологического благополучия человека зависят от полноты собранных данных. Оценка точности прогноза – необходимая часть процедуры квалифицированного прогнозирования, основанная на вероятностно-статистических моделях восстановления зависимости. Основой прогнозирования экологического благополучия человека в территориальной техносфере является использование данных мониторинга за предыдущий период (апостериорной информации) и априорная информация, т.е. совокупность сведений, полученная в результате предварительного теоретического исследования (модель изменения экологического благополучия человека) [4].

Для получения эмпирических зависимостей автором использована аппроксимация кубическими сплайнами. Она позволяет представить результаты мониторинга степенной функцией с высокой точностью. Этот метод основан на разделении анализируемого интервала на отрезки. На каждом из этих отрезков функция определяется многочленом третьей степени, коэффициенты в котором подбирают так, чтобы обеспечить в граничных точках интервала непрерывность самой функции и ее производных – первой и второй. Далее в граничных точках интервала задаются значения производных – первой и второй. Если граничные значения первой и второй производных известны, то получаем точную схему интерполяции, если первая производная неизвестна, а вторая равна нулю, то возможно получить точные результаты [5, 6].

Если есть точки x_1, x_2, \dots, x_n и им соответствуют значения y_1, y_2, \dots, y_n , то на любом отрезке $[x_i, x_{k+1}]$, $k=1, 2, \dots, n-1$ функция будет иметь вид

$$\hat{y} = ex^3 + fx^2 + lx + m, \quad (1)$$

где \hat{y} – рассчитанное значение анализируемого параметра.

Чтобы рассчитать коэффициенты этого многочлена m_k, l_k, f_k, e_k , $k=1, 2, \dots, n-1$, необходимо найти решения системы линейных уравнений с непрерывной производной в узлах сетки и дополнительных граничных условий для второй производной [7]:

$$\begin{cases} e \sum x_i^3 + f \sum x_i^2 + l \sum x_i + nm = \sum y_i; \\ e \sum x_i^4 + f \sum x_i^3 + l \sum x_i^2 + m \sum x_i = \sum x_i \cdot y_i; \\ e \sum x_i^5 + f \sum x_i^4 + l \sum x_i^3 + m \sum x_i^2 = \sum x_i^2 \cdot y_i; \\ e \sum x_i^6 + f \sum x_i^5 + l \sum x_i^4 + m \sum x_i^3 = \sum x_i^3 \cdot y_i, \end{cases} \quad (2)$$

где y_i – измеренное значение анализируемого параметра.

Коэффициент корреляции определяем по формуле

$$k_{\text{кор}} = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}}, \quad (3)$$

где \bar{y} – среднее арифметическое значение измеряемого параметра, определяем по формуле

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i. \quad (4)$$

Коэффициент детерминации определяем по формуле

$$k_{\text{дет}} = k_{\text{кор}}^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}. \quad (5)$$

Среднюю ошибку аппроксимации определяем по формуле

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции изменяется в пределах $[-1; 1]$, причем, если $k_{\text{кор}} \geq 0,7$ – точность прогнозирования высокая; $0,5 \leq k_{\text{кор}} < 0,7$ – точность прогнозирования хорошая; $0,3 \leq k_{\text{кор}} < 0,5$ – точность прогнозирования удовлетворительная; $k_{\text{кор}} < 0,3$ – точность прогнозирования неудовлетворительная [8].

При этом точность прогноза оценивается величиной доверительного интервала для заданной вероятности его осуществления, а под достоверностью понимают оценку вероятности осуществления прогноза в заданном доверительном интервале. Таким образом, точность прогноза выражается с помощью вероятностных пределов фактической величины от прогнозируемого значения.

Результаты и обсуждение

Автором предложен алгоритм оценки точности и достоверности прогноза модели Лотки – Вольтерры на основе аппроксимации кубическими сплайнами, заключающийся в следующем (рис. 2).

Измеряем значения факторов опасности $C_1 \dots C_4$ и, проведя для них аппроксимацию кубическими сплайнами, получаем математическое описание функции $C_i^{an} = f(t_i)$ по формуле (1)

и значения факторов опасности C_0^{an} и C_5^{an} , где C_i^{an} – аппроксимированные значения анализируемого фактора опасности, t_i – время.

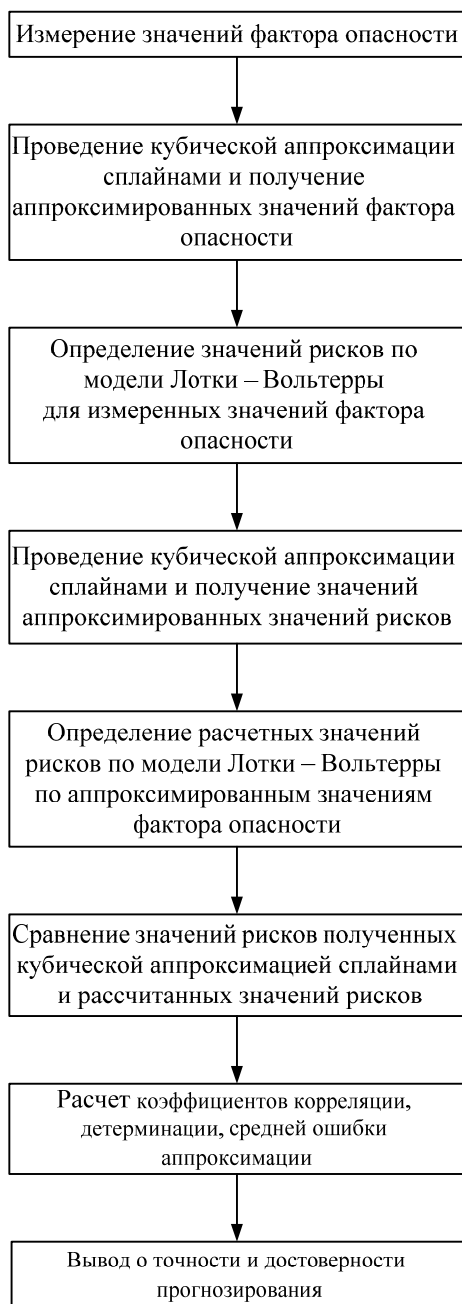


Рис. 2. Алгоритм оценки точности и достоверности прогноза модели Лотки – Вольтерры

На основе измеренных значений факторов опасности $C_1 \dots C_4$, используя модель [3], определяем значения рисков для здоровья человека, экологического и техногенного риска $r_1 \dots r_4$.

Для рассчитанных значений рисков $r_1 \dots r_4$ проводим аппроксимацию кубическими сплайнами и получаем математическое описание функции $r_i^{an} = f(t_i)$ по формуле (1) и значения рисков r_0^{an} и r_5^{an} , где r_i^{an} – аппроксимированные значения рисков от действия анализируемого фактора опасности.

По значениям C_0^{an} и C_5^{an} , используя модель [3], определяем значения r_0^{pac} и r_5^{pac} , которые сравниваем с r_0^{an} и r_5^{an} .

По формулам (3)–(6) определяем коэффициенты корреляции, детерминации, среднюю ошибку аппроксимации и делаем вывод о точности и достоверности прогнозирования.

Результаты реализации алгоритма оценки точности и достоверности прогноза модели Лотки – Вольтерры приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Номер отсчета	Измеренное значение фактора опасности	Аппроксимированное значение фактора опасности	Рассчитанное значение риска	Аппроксимированное значение риска
x	y	\hat{y}	r	\hat{r}
– 1ап	–	5,2563	0,9557*	0,9557
1	4,9	5,0357	0,8909	0,9156
2	4,9	4,6024	0,8909	0,8368
3	4,2	4,1881	0,7636	0,7614
4	3,6	3,9095	0,6545	0,7108
5	3,8	3,8833	0,6909	0,7060
6	4,6	4,2262	0,8363	0,7684
7	4,9	5,0548	0,8909	0,9190
7ап	–	5,8336	1,0607*	1,0607

Примечание. * – значения рисков, рассчитанные по результатам аппроксимации.

Таблица 2

Параметр	Для значений фактора опасности	Для значений риска
Коэффициент корреляции	0,8920	0,8921
Коэффициент детерминации	0,7957	0,7958
Средняя ошибка аппроксимации, %	4,4575	4,4566

Получены уравнения кубической аппроксимации:

– для значений фактора опасности:

$$\hat{y} = 0,0194x^3 - 0,1071x^2 + 0,2480x + 5,3714;$$

– для значений риска:

$$\hat{r} = 0,0035x^3 - 0,0195x^2 - 0,0451x + 0,9766.$$

Значения коэффициентов корреляции и детерминации, средней ошибки аппроксимации приведены в табл. 2.

Графические зависимости параметров, представленных в табл. 1, приведены на рис. 3.

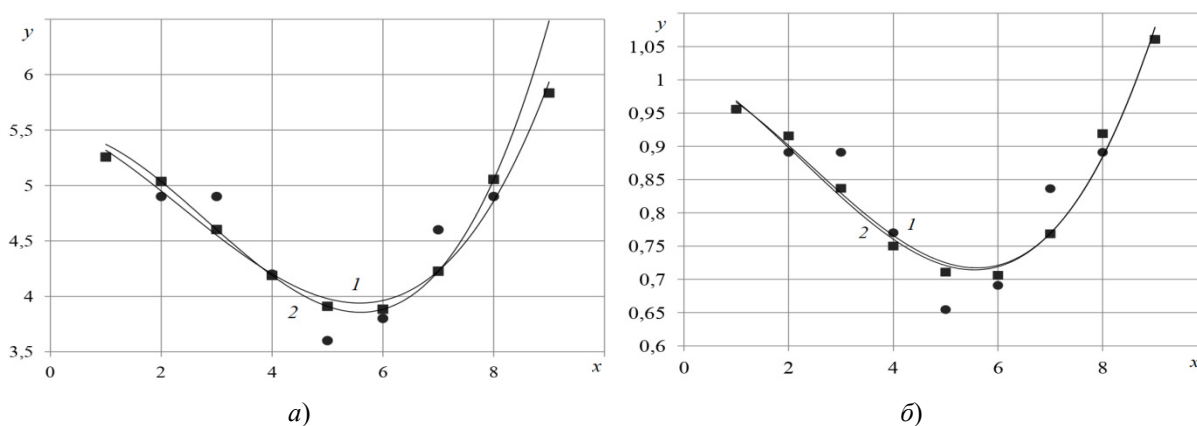


Рис. 3. Результаты кубической аппроксимации: а – измеренные (1) и аппроксимированные значения фактора опасности (2); б – рассчитанные (1) и аппроксимированные значения риска (2)

Из статьи [9] известно, что точность и достоверность прогноза тем выше, чем меньше величина ошибки, которая представляет собой разность между прогнозируемым и фактическим значениями исследуемой величины. Эта разность характеризуется коэффициентами корреляции, детерминации и средней ошибкой аппроксимации. Анализ полученных результатов, приведенных в табл. 2, показывает следующее.

Так как коэффициент корреляции, являющейся мерой силы связи между исследуемыми величинами, равен для фактора опасности $k_{кор}^{ФО} = 0,8920$, а для риска $k_{кор}^{риск} = 0,8921$, то имеется сильная (высокая) связь между исследуемыми величинами [10]. При этом дисперсия значений исследуемых величин (коэффициент детерминации) составляет $k_{дет}^{ФО} = 0,7957$ для значений фактора опасности и $k_{дет}^{риск} = 0,7958$ для значений риска.

Учитывая, что средняя ошибка аппроксимации (для фактора опасности – $\bar{A}^{ФО} = 4,4575$ % и для риска – $\bar{A}^{риск} = 4,4566$ %) менее 10 % [10], можно отметить, что модель аппроксимации кубическими сплайнами выбрана правильно, корректно описывает связь между исследуемыми величинами и позволяет обеспечить точность прогноза для фактора опасности – 0,955425 и для риска – 0,955434.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование показало корректность использования модели Лотки – Вольтерры для моделирования и прогнозирования экологического благополучия человека.

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения. URL: <https://www.who.int/ru/news/item/15-03-2016-an-estimated-12-6-million-deaths-each-year-are-attributable-to-unhealthy-environments> (дата обращения: 29.10.2022).
2. Volterra V. *Mathematical theory of the struggle for existence*. Moscow : Nauka, 1976. P. 286.
3. Bezborodova O. E. Forecasting the State of the Environment Based on the Assessment of Technogenic Risk // *Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering : IV International Conference "MIST: Aerospace – 2021"*. URL: <https://conf.domnit.ru/ru/materialy/mist-aerospace-2021/> (дата обращения: 26.10.2022).
4. Светульников И. С., Светульников С. Г. *Методы социально-экономического прогнозирования* : в 2 т. Т. 1. Теория и методология : учебник и практикум для вузов. М. : Юрайт, 2022. 315 с.
5. Светульников И. С., Светульников С. Г. *Методы социально-экономического прогнозирования* : в 2 т. Т. 2. Модели и методы : учебник и практикум для вузов. М. : Юрайт, 2022. 447 с.
6. Черкашина Ю. А. Применение кубической сплайн интерполяции в задачах прогнозирования функционального состояния здоровья детей // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 4–5. С. 887–890. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=9096> (дата обращения: 31.10.2022).
7. Де Бор К. *Практическое руководство по сплайнам* : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1985. 304 с.
8. Голик Е. С., Афанасьева О. В. *Теория и методы статистического прогнозирования* : учеб. пособие. СПб. : Изд-во СЗТУ, 2007. 182 с.
9. Баврина А. П., Борисов И. Б. Современные правила применения корреляционного анализа // *Медицинский альманах*. 2021. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-pravila-primeneniya-korrelyatsionno-go-analiza> (дата обращения: 31.10.2022).

References

1. *Vsemirnaya organizatsiya zdravookhraneniya = World Health Organization*. (In Russ.). Available at: <https://www.who.int/ru/news/item/15-03-2016-an-estimated-12-6-million-deaths-each-year-are-attributable-to-unhealthy-environments> (accessed 29.10.2022).
2. Volterra V. *Mathematical theory of the struggle for existence*. Moscow: Nauka, 1976:286.
3. Bezborodova O.E. Forecasting the State of the Environment Based on the Assessment of Technogenic Risk. *Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering : IV International Conference "MIST: Aerospace – 2021"*. Available at: <https://conf.domnit.ru/ru/materialy/mist-aerospace-2021/> (accessed 26.10.2022).

4. Svetun'kov I.S., Svetun'kov S.G. *Metody sotsial'no-ekonomicheskogo prognozirovaniya: v 2 t. T. 1. Teoriya i metodologiya: uchebnik i praktikum dlya vuzov = Methods of socio-economic forecasting : in 2 vols. 1. Theory and methodology : textbook and workshop for universities.* Moscow: Yurayt, 2022:315. (In Russ.)
5. Svetun'kov I.S., Svetun'kov S.G. *Metody sotsial'no-ekonomicheskogo prognozirovaniya: v 2 t. T. 2. Modeli i metody: uchebnik i praktikum dlya vuzov = Methods of socio-economic forecasting : in 2 vols. 2. Models and methods : textbook and workshop for universities.* Moscow: Yurayt, 2022:447. (In Russ.)
6. Cherkashina Yu.A. Application of cubic spline interpolation in the tasks of forecasting the functional state of children's health. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2016;(4–5):887–890. (In Russ.). Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=9096> (accessed 31.10.2022).
7. De Bor K. *Prakticheskoe rukovodstvo po splaynam: per. s angl. = Practical guide to splines : trans. from English.* Moscow: Radio i svyaz', 1985:304. (In Russ.)
8. Golik E.S., Afanas'eva O.V. *Teoriya i metody statisticheskogo prognozirovaniya: ucheb. posobie = Theory and methods of statistical forecasting : textbook.* Saint Petersburg: Izd-vo SZTU, 2007:182. (In Russ.)
9. Bavrina A.P., Borisov I.B. Modern rules for the use of correlation analysis. *Meditinskiy al'manakh = Medical almanac.* 2021;(3). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-pravila-primeneniya-korrelyatsionnogo-analiza> (accessed 31.10.2022).

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

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 334.021

doi:10.21685/2307-5538-2022-4-7

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ПОВЕРКЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

А. А. Восканян¹, И. А. Кострикина²

¹ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

¹voskanian.nastya@gmail.com, ²gmetr@niiemp.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность предлагаемой методики оценки рисков в поверочной деятельности определяется новыми требованиями в критериях к аккредитации метрологических служб на право поверки средств измерений и ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Целью работы является выбор методов выявления и оценки рисков при поверке средств измерений. *Материалы и методы.* Для решения данной задачи использовался метод FMEA и метод матрицы последствий и вероятностей по показателям «вероятность риска» и «уровень влияния риска». *Результаты.* В ходе работы предложена методика оценки рисков при поверке средств измерений, которая является отдельным разделом руководства по качеству поверочной деятельности. *Выводы.* Положительные результаты работы открывают перспективу эффективного применения методики как для подсистем поверочной деятельности, так и для процедур системы менеджмента качества предприятия, реализующего требования ГОСТ Р ИСО 9001–2015.

Ключевые слова: риски, поверка средств измерений, риск-менеджмент, реестр рисков

Для цитирования: Восканян А. А., Кострикина И. А. Методика оценки рисков деятельности по поверке средств измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 51–57. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-7

METHODOLOGY FOR ASSESSING RISKS IN VERIFICATION OF MEASURING INSTRUMENTS

A.A. Voskanyan¹, I.A. Kostrikina²

¹ Penza State University, Penza, Russia

² Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

¹voskanian.nastya@gmail.com, ²gmetr@niiemp.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the proposed methodology for assessing risks in verification activities is determined by the new requirements in the criteria for accreditation of metrological services for the right to verify measuring instruments and GOST R ISO 9001–2015. The aim of the work is to select methods for identifying and assessing risks when calibrating measuring instruments. *Materials and methods.* To solve this problem, the FMEA method and the method of the matrix of consequences and probabilities for the indicators «risk probability» and «risk impact level» were used. *Results.* In the course of the work, a methodology for assessing risks in the verification of measuring instruments was proposed, which is a separate section of the manual on the quality of verification activities. *Conclusions.* Positive results of the work open up the prospect of effective application of the methodology both for subsystems of verification activities and for the procedures of the quality management system of an enterprise that implements the requirements of GOST R ISO 9001–2015.

Keywords: risks, verification of measuring instruments, risk management, risk register

For citation: Voskanyan A.A., Kostrikina I.A. Methodology for assessing risks in verification of measuring instruments. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):51–57. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-7

В настоящее время в России руководители большинства предприятий традиционно считают риск-менеджмент специализированной и обоснованной деятельностью, которая касается управления страховыми и валютными рисками. Но с выходом в ноябре 2015 г. новой версии национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 9001–2015 «Системы менеджмента качества. Требования»¹, принятого на основе международного стандарта ISO 9001:2015, вводится новый подход к риск-менеджменту, который заключается в применении риск-ориентированного мышления для достижения результативности системы менеджмента качества. В 6.1 ГОСТ Р ИСО 9001–2015 указано, что при планировании в системе менеджмента качества организация должна определить риски и возможности, подлежащие рассмотрению.

Чтобы соответствовать требованиям новой версии стандарта, организациям необходимо планировать и осуществлять действия в ответ на риски и возможности. В соответствии с новой версией стандарта организации должны будут идентифицировать риски и возможности, которые могут повлиять на результативность их системы менеджмента качества (СМК) или нарушить работу, а затем определять действия для уменьшения этих рисков и повышения возможностей. Также организации должны определить, как они собираются сделать эти действия частью своих процессов СМК и как они будут осуществлять контроль, оценку и анализ эффективности этих действий и процессов.

«Ресурсы для мониторинга и измерения» относятся к числу основных элементов СМК, поэтому требования риск-ориентированного подхода на них распространяются в полную меру. Одним из основных таких ресурсов является обеспечение единства измерений путем проверки средств измерений, при выполнении которой также необходимо применять риск-ориентированный подход. Таким образом в связи с введением ГОСТ Р ИСО 9001–2015 требование применения риск-ориентированного подхода становится обязательным при разработке комплекта документов системы менеджмента качества поверочной деятельности, в том числе при аккредитации в области обеспечения единства измерений.

Кроме того, согласно приказу Министерства экономического развития РФ от 26 октября 2020 г. № 707 «Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации», согласно пункту 46.13 одним из критериев аккредитации метрологической службы на право проведения проверки является рассмотрение рисков. Как правило, данная процедура оформляется индивидуально к каждому предприятиям в виде положения в составе руководства по качеству.

При этом возникает проблема выбора метода анализа и оценки рисков, так как в настоящее время для поверочной деятельности такой методики нет.

Авторами был проведен анализ методов оценки риска на основе ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011².

Анализ методов показал, что наиболее эффективным для внедрения в поверочную деятельность является метод анализа видов и последствий отказов FMEA, так как данный метод может применяться не только на стадии разработки процесса, но и для доработки, улучшения уже запущенных процессов, что немаловажно для предприятий, у которых поверочная деятельность осуществляется уже длительное время с действующей системой менеджмента качества.

Суть метода FMEA сводится к выполнению следующих этапов:

- а) определение области применения и целей исследования;
- б) формирование рабочей группы;
- в) изучение системы/процесса, для которых применяют метод FMECA;
- г) деление системы на компоненты или этапы;
- д) определение функции каждого этапа или компонента.
- е) определение для каждого компонента или этапа:
 - возможных отказов и их причин;
 - механизмов, приводящих к данным видам отказа;

¹ ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования.

² ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска.

- последствий отказов;
- уровень безопасности или разрушительности последствий отказа;
- способы обнаружения отказа;
- ж) идентификация особенностей проекта, позволяющих компенсировать отказ.

Как видно из приведенных этапов, реализация метода начинается с создания рабочей группы.

Формирование рабочей экспертной группы начинается с выбора кандидатов в эксперты. При их выборе рекомендуется использовать контрольные листы, которые содержат следующие критерии:

- требования к образованию (теоретической подготовке);
- требования к технологической компетентности (опыт работы по направлению деятельности, которая в риск-менеджменте выступает объектом управления);
- требования к опыту работы в составе экспертных комиссий и групп;
- требования к профессионализму и объективности;
- отсутствие личной заинтересованности в результатах экспертизы;
- наличие положительных рекомендаций и отзывов.

После выбора кандидатов в эксперты проводится количественная (расчетная) оценка их качества и отсеивание некоторых кандидатов. Простейший подход к последней процедуре основан на оценке близости мнения эксперта к среднему мнению группы. В случае большого расхождения кандидат «отбраковывается».

Ниже на основе работы [1] авторами предлагается методика расчетной оценки качества экспертов.

Исходные данные: зачетное число специалистов-экспертов, из которых формируется экспертная группа – n , число ранжируемых факторов рисков ситуации – k .

1. Каждому i -му эксперту ($i = 1, 2, \dots, n$) предлагается проранжировать все расчетные факторы, влияющие на ситуацию, для которой в дальнейшем будет проводиться экспертная оценка рисков, т.е. предлагается установить α_{ij} -ранг j -го фактора, $j = 1, 2, \dots, k$.

В результате получается матрица-строка мнений каждого i -го эксперта относительно значимости всех факторов (по отдельности для каждого фактора):

$$|\alpha_i| = |\alpha_{i_1}, \alpha_{i_2}, \dots, \alpha_{i_k}|. \quad (1)$$

Отсюда можно определить среднее значение модуля $|\alpha_j|$ оценки j -го фактора по всем экспертам:

$$|\alpha_j| = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij}}{n}. \quad (2)$$

2. При этом отклонение мнения каждого эксперта от среднего мнения группы относительно значимости j -го фактора равно

$$\Delta\alpha_{ij} = |\alpha_{ij} - |\alpha_j||. \quad (3)$$

Эта процедура дает матрицу-строку отклонений мнений i -го эксперта по всем факторам (элементы этой матрицы соответствуют по отдельности каждому фактору):

$$D_i = |\Delta\alpha_{i_1}, \Delta\alpha_{i_2}, \dots, \Delta\alpha_{i_k}|. \quad (4)$$

3. Повторив последнюю процедуру по каждому i -му эксперту, получим матрицу отклонений мнений всех экспертов от средних мнений (по каждому фактору отдельно):

$$D = |D_j| = \begin{vmatrix} \Delta\alpha_{11} & \Delta\alpha_{21} & \dots & \Delta\alpha_{i1} & \Delta\alpha_{n1} \\ \Delta\alpha_{12} & \Delta\alpha_{22} & \dots & \Delta\alpha_{i2} & \Delta\alpha_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta\alpha_{1j} & \Delta\alpha_{2j} & \dots & \Delta\alpha_{ij} & \Delta\alpha_{nj} \\ \Delta\alpha_{1k} & \Delta\alpha_{2k} & \dots & \Delta\alpha_{ik} & \Delta\alpha_{nk} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

4. Затем определяем сумму отклонений мнений i -го эксперта по всем факторам:

$$\Delta\alpha_i = \sum_{j=1}^k \Delta\alpha_{ij}. \quad (6)$$

5. Далее определяем сумму отклонений мнений всех экспертов по всем факторам:

$$\overline{\Delta\alpha} = \sum_{i=1}^n \Delta\alpha_i. \quad (7)$$

6. После этого определяем среднее отклонение мнений i -го эксперта по всем факторам от среднего мнения группы:

$$\overline{\Delta\alpha}_i = \overline{\Delta\alpha} - \Delta\alpha_i. \quad (8)$$

7. В результате предыдущего действия получаем матрицу-строку отклонений для всех экспертов:

$$\overline{D} = |\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots, \Delta\alpha_i, \dots, \Delta\alpha_n|. \quad (9)$$

8. Далее следует перенумеровать экспертов в зависимости от расстояния их мнений от средних, так, чтобы на первом месте был эксперт с наименьшим расстоянием от среднего по группе, далее – по возрастанию отклонений, а на последнем месте – эксперт с наибольшим расстоянием от среднего по группе. В результате получаем упорядоченный кортеж отклонений:

$$\overline{D}' < \Delta\alpha_{1^*}, \Delta\alpha_{2^*}, \dots, \Delta\alpha_{n^*} >. \quad (10)$$

Соответствующий список экспертов по новым номерам: $1^*, 2^*, \dots, i^*, \dots, n^*$ (в порядке убывания качества мнений).

9. Окончательная (зачетная) численность экспертной группы может быть определена путем исключения из списка тех экспертов, мнение которых находится на большом расстоянии от центра.

В ходе определения оптимальной численности экспертной группы необходимо учитывать, что при малом их числе появляется излишнее влияние оценки каждого эксперта на общий результат. В свою очередь, при большом числе трудно вырабатывается единое (консолидированное) мнение экспертной группы. В общем случае следует отметить, что численность экспертной группы зависит от требований к точности результатов экспертизы и допустимой трудоемкости оценочных процедур.

На втором этапе реализации методики экспертная группа определяет виды рисков и угроз.

Экспертной группой в течение года проводятся работы по идентификации и оценке рисков/возможностей при проверке СИ, по результатам проведенных работ формируется перечень рисков/возможностей, который может пересматриваться, уточняться и/или дополняться вновь выявленными рисками/возможностями. Перечень рисков/возможностей утверждается заместителем генерального директора по качеству (или лицом его заменяющим) и актуализируется не реже одного раза в год.

Если в течение года в МС возникают новые риски/возможности, то они дополнительно вносятся в перечень рисков/возможностей.

Перечень рисков/возможностей МС при проверке СИ оформляется в соответствии с приложением А.

В результате оценки и анализа рисков/возможностей составляется «Реестр рисков/возможностей» (далее – «Реестр»), оформленный по форме приложения Б.

Оценка влияния рисков/возможностей проводится экспертной группой методом матрицы последствий и вероятностей по показателям «вероятность риска» и «уровень влияния риска» (уровень влияния оценивается по максимальному из трех критериев), которые выбираются из указанных значений согласно табл. 1, 2.

Таблица 1

Показатель 1 «Вероятность риска»

Значение	Вероятность наступления
0,2	1–20 % (ничтожная)
0,4	21–40 % (низкая)
0,6	41–60 % (средняя)
0,8	61–80 % (высокая)
1,0	81–100 % (очень высокая)

Таблица 2

Показатель 2 «Уровень влияния риска»

Значение	Ценовой критерий	Временной критерий	Критерий степени влияния
0,2	Увеличение стоимости затрат не более чем на 15 % от плановой	Увеличение длительности не более чем на 15 % от плановой	Слабо влияющий
0,4	Увеличение стоимости затрат на 16–35 % от плановой	Увеличение длительности на 16–35 % от плановой	Приемлемо влияющий
0,6	Увеличение стоимости затрат на 36–55 % от плановой	Увеличение длительности на 36–55 % от плановой	Значительно влияющий
0,8	Увеличение стоимости затрат на 56–75 % от плановой	Увеличение длительности на 56–75 % от плановой	Сильно влияющий
1,0	Увеличение стоимости затрат на 76 % и более от плановой	Увеличение длительности на 76 % и более от плановой	Критично влияющий

На основании полученных значений вероятности риска и уровня влияния риска из табл. 1, 2 главным метрологом осуществляется общая оценка риска согласно матрице последствий и вероятности риска (табл. 3).

Таблица 3

Матрица последствий и вероятности риска

Вероятность риска	Уровень влияния риска				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20
0,4	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40
0,6	0,12	0,24	0,36	0,48	0,60
0,8	0,16	0,32	0,48	0,64	0,80
1,0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00

Таблица 3 позволяет оценить значимость каждого риска.

Риски с условной оценкой от 0 до 0,15 являются *незначительными*, не требуют разработки мероприятий по их устранению. Возможность реализуется.

Риски с условной оценкой от 0,16 до 0,50 являются *умеренными*, требуют разработки мероприятий по их устранению и периодического мониторинга. Возможность реализуется, но не полностью.

Риски с условной оценкой от 0,51 до 1,00 являются *критическими*, требуют особого внимания и устранения независимо от затрат. Возможность не реализуется.

В конце года главным метрологом на основании реестра рисков/возможностей МС при проверке СИ оформляется отчет об анализе эффективности корректирующих действий в отношении рисков/возможностей МС в произвольной форме и утверждается заместителем генерального директора по качеству (или лицом его заменяющим).

Предпринимаемые действия, связанные с рисками и возможностями, должны быть соразмерны их потенциальному влиянию на достоверность результатов, связанных с проверкой СИ в области аккредитации.

Примерами действий, связанных с рисками, могут быть:

- идентификация и предупреждение рисков,
- принятие рисков с целью реализации возможности,
- устранение источника риска,
- изменение вероятности риска или его последствий,
- разделение рисков,
- сохранение риска посредством обоснованного решения.

Примерами возможностей могут быть:

- расширение области аккредитации,
- использование новых технологий или других возможностей с целью удовлетворения потребностей заказчиков.

Данная методика может вполне эффективно применяться как для подсистем поверочной деятельности, так и для процедур системы менеджмента качества предприятия, выполняющего реализацию требований ГОСТ Р ИСО 9001–2015.

Список литературы

1. Гайков-Алехов А. А., Агафонов В. А. Планирование и организация эксперимента на базе пакета STATISTICA : лабораторный практикум. СПб., 2004.

References

1. Gaykov-Alekhov A.A., Agafonov V.A. *Planirovanie i organizatsiya eksperimenta na baze paketa STATISTICA: laboratornyy praktikum = Planning and organization of an experiment based on the STATISTICA package : laboratory workshop*. Saint Petersburg, 2004. (In Russ.)

Приложение А
(обязательное)

Перечень рисков/возможностей при поверке СИ

(наименование подразделения)

№ п/п	Риск / возможность	Вероятность возникновения	Опасности, которые могут вызвать данный риск/возможность	Возможные последствия	Значимость последствий
1					
2					
...					

П р и м е ч а н и е. При заполнении Перечня рисков/возможностей первыми вносятся идентифицированные риски, далее в строках ниже – возможности.

Приложение Б
(обязательное)

Реестр рисков/возможностей при поверке СИ на 202__ г.

№ п/п	Наименование риска / возможности	Вероятность возникновения риска / возможности	Степень влияния риска / возможности на результат (ущерб)	Значимость риска / возможности	Мероприятия по минимизации рисков и реализации возможностей	Срок выполнения мероприятий	Ответственное лицо за выполнение мероприятий
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
...							

П р и м е ч а н и е. При заполнении Реестра рисков/возможностей первыми вносятся идентифицированные риски, далее в строках ниже – возможности.

Информация об авторах / Information about the authors

Анастасия Антоновна Восканян

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

Anastasia A. Voskanyan

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

Инна Анатольевна Кострикина

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

Inna A. Kostrikina

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

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

Поступила в редакцию/Received 27.04.2022

Поступила после рецензирования/Revised 27.05.2022

Принята к публикации/Accepted 24.06.2022

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. А. Печерская¹, Д. Е. Тузова², П. Е. Голубков³

^{1,2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹pea1@list.ru, ²diana.tuzova.02@bk.ru, ³dmitrartamon@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются измерительные каналы магнитной индукции и напряженности магнитного поля, входящие в состав программно-аппаратного комплекса для измерения параметров магнитных материалов. Предметом исследования являются метрологические характеристики каналов измерения параметров магнитных материалов, с целью улучшения которых в работе выполнен функциональный и метрологический анализ измерительных каналов. Цель работы – улучшение метрологических характеристик измерения параметров магнитных материалов. *Материалы и методы.* Рассмотрена структура программно-аппаратного комплекса для исследования параметров магнитных материалов с целью проведения функционального и метрологического анализа измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля. *Результаты.* Разработаны структурные и функциональные метрологические модели измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля. *Выводы.* Получены аналитические выражения и модели преобразования измерительных каналов. Модели имеют ограничения (потери на перемагничивание, нагрев магнитопровода), устранение которых является объектом дальнейших исследований.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, функциональный и метрологический анализ измерительных каналов, измерения параметров магнитных материалов, модели преобразования измерительных каналов

Для цитирования: Печерская Е. А., Тузова Д. Е., Голубков П. Е. Функциональный и метрологический анализ каналов измерения параметров магнитных материалов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 58–63. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-8

FUNCTIONAL AND METROLOGICAL ANALYSIS OF MEASURING CHANNELS OF MAGNETIC MATERIALS PARAMETERS

E.A. Pecherskaya¹, D.E. Tuzova², P.E. Golubkov³

^{1,2,3} Penza State University, Penza, Russia

¹pea1@list.ru, ²diana.tuzova.02@bk.ru, ³dmitrartamon@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is measuring channels of magnetic induction and magnetic field strength, as part of a software and hardware complex for measuring the parameters of magnetic materials. The subject of the research is the development of functional and metrological analysis of measuring channels of parameters of magnetic materials. The aim of the work is to improve the metrological characteristics of measuring the parameters of magnetic materials. *Materials and methods.* The structure of a hardware and software complex for studying the parameters of magnetic materials is considered, in order to conduct a functional and metrological analysis of measuring channels of magnetic induction and magnetic field strength according to the methodology of G.P.Shlykov. *Results.* Structural and functional metrological models of measuring channels of magnetic induction and magnetic field strength have been developed. *Conclusions.* Analytical expressions and models of transformation of measuring channels are obtained. The models have limitations (losses on remagnetization, heating of the magnetic circuit), the elimination of which is the object of further research.

Keywords: hardware and software complex, functional and metrological analysis of measuring channels, measurement of magnetic materials parameters, models of measuring channel conversion

For citation: Pecherskaya E.A., Tuzova D.E., Golubkov P.E. Functional and metrological analysis of measuring channels of magnetic materials parameters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):58–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-8

Введение

Магнитные материалы представляют собой вещества, которые заметно изменяют свою намагниченность при воздействии на них возбуждающего внешнего магнитного поля. В настоящее время они нашли широкое применение в современной технике. Магнетики используются в разных сферах – приборостроении, электронике, радиотехнике, вычислительной технике [1–5]. Из них изготавливаются магнитные усилители, магнитопровода, трансформаторы, сердечники дросселей и другие элементы технических устройств. Производство компонентов и изделий на основе магнитомягких материалов обязательно включает в себя процессы измерения их параметров. Измерение этих параметров в основном производится косвенно, посредством обработки результатов измерений петель намагничивания (петель гистерезиса) при различных частотах переменного магнитного поля. В настоящее время методики выполнения измерений параметров магнитных материалов регламентируются по ГОСТ 8.377-80¹. На российском рынке электронных средств измерения имеется ряд установок, реализующих данные методики измерения. К ним относятся, к примеру, магнитоизмерительная установка МК-3Э отечественного производства и итальянская установка MATS-2010H. Обе установки имеют достаточно крупные габариты и диапазон тока намагничивания образцов не более 20 А. Помимо этого, данные установки обладают большой погрешностью при измерениях. Например, метрологические характеристики отечественной установки МК-3Э приведены в табл. 1 [6]. Для изготовления компонентов и изделий из магнитных материалов на производстве требуются приборы, обладающие более низкими погрешностями, что в целом способствует улучшению технико-экономических показателей готовой продукции. Таким образом, исследование метрологических характеристик с целью повышения точности измерений параметров магнитных материалов является актуальной задачей.

Таблица 1

Метрологические характеристики магнитоизмерительной установки МК-3Э

Параметр магнитного материала	Значение относительной погрешности при измерении, %
Точки магнитной петли гистерезиса и основной кривой намагничивания по индукции	±3
Коэрцитивная сила по индукции	±2
Остаточная индукция	±3
Начальная магнитная проницаемость	±8
Максимальная магнитная проницаемость	±5

На кафедре «Информационно-измерительная техника и метрология» Пензенского государственного университета разработан программно-аппаратный комплекс для измерения параметров магнитных материалов. В данной работе предложены структурные и функциональные модели измерительных каналов напряженности и индукции магнитного поля, а также их функции преобразования, что способствует минимизации погрешности измерений.

Материалы и методы

Для выполнения экспериментов применен программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить измерение следующих параметров магнитных материалов:

- напряженность магнитного поля H ;
- магнитная индукция B ;
- начальная μ_n и дифференциальная μ_d магнитная проницаемость;
- предельная и частные петли гистерезиса, основная кривая намагничивания (строятся на основе измеренных значений B и H).

Структура измерительных каналов параметров магнитных материалов (напряженности магнитного поля и магнитной индукции) показана на рис. 1. Исследуемый образец представ-

¹ ГОСТ 8.377-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик.

ляет собой трансформатор, намотанный на тороидальном сердечнике из магнитного материала, параметры которого необходимо измерить. Число витков первичной и вторичной обмоток известно. Синусоидальное напряжение регулируемой частоты в диапазоне от 10 Гц до 2 кГц с цифрового синтезатора сигналов масштабируется усилителем намагничивания и поступает на первичную обмотку трансформатора, в которой начинает протекать ток намагничивания. Этот ток измеряется датчиком тока, который представляет собой низкоомный резистор, подключенный последовательно к первичной обмотке трансформатора. На вторичной обмотке при этом наводится ЭДС индукции, пропорциональная производной от магнитного потока через образец. Этот сигнал поступает на интегрирующий усилитель, который выполняет линеаризацию. Выходные сигналы интегрирующего усилителя и датчика тока через коммутатор подаются на вход АЦП, и полученный цифровой код через COM-порт поступает на компьютер для дальнейшей обработки.

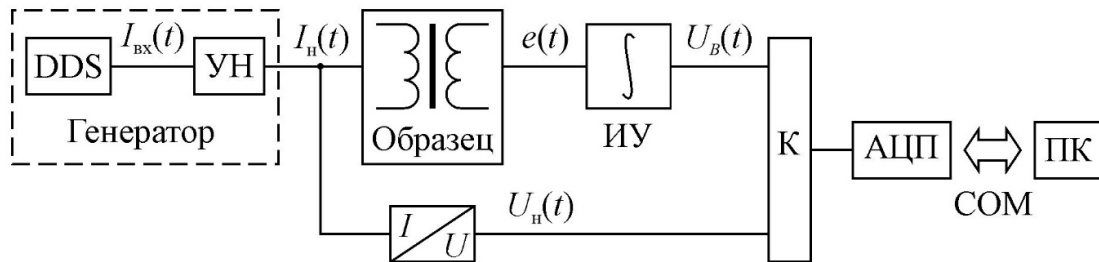


Рис. 1. Структура измерительных каналов параметров магнитных материалов: *DDS* – цифровой синтезатор сигналов; *УН* – усилитель намагничивания; *ИУ* – интегрирующий усилитель; *I/U* – преобразователь тока в напряжение; *К* – коммутатор; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь

Функциональный и метрологический анализ измерительных каналов программно-аппаратного комплекса выполнялся согласно методике, предложенной в работе [7].

Результаты

Структурные функциональные модели измерительных каналов

Измерительный канал магнитной индукции. Пренебрегая потерями на перемагничивание и нагрев магнитопровода, при расчете функции преобразования магнитной индукции будем принимать во внимание только вторичную обмотку.

На вторичную обмотку трансформатора подается магнитный поток Φ , создаваемый током первичной обмотки. Этот магнитный поток пропорционален магнитной индукции $B(t)$:

$$\Phi = B(t)S_{mp}, \quad (1)$$

где S_{mp} – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Магнитный поток Φ наводит во вторичной обмотке ЭДС индукции:

$$e(t) = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = w_2 S_{mp} \frac{dB(t)}{dt}, \quad (2)$$

где w_2 – число витков вторичной обмотки. Таким образом, вторичная обмотка трансформатора представляет собой дифференцирующее звено по отношению к магнитной индукции. Чтобы привести выходной сигнал измерительного канала к линейному виду, используется интегрирующий операционный усилитель, выходной сигнал которого равен

$$U_B(t) = \frac{w_2 S_{mp}}{\tau} \int \frac{dB(t)}{dt} dt = \frac{w_2 S_{mp}}{R_i C_i} B(t), \quad (3)$$

где $\tau = R_i C_i$ – постоянная времени интегратора. Выражение (3) представляет собой идеальную функцию преобразования измерительного канала магнитной индукции, приведенную ко входу АЦП.

Структурные функциональные модели измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля представлены на рис. 2.

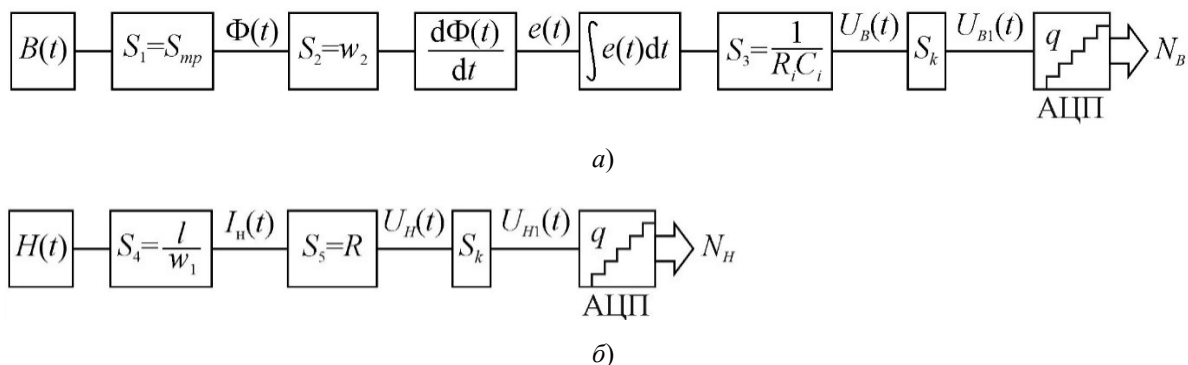


Рис. 2. Структурные функциональные модели измерительных каналов магнитной индукции (а) и напряженности магнитного поля (б)

Измерительный канал напряженности магнитного поля. На вход измерительного канала подается ток намагничивания $I_n(t)$, пропорциональный напряженности магнитного поля $H(t)$:

$$I_n(t) = H(t) \frac{l}{w_1}, \quad (4)$$

где w_1 – число витков первичной обмотки; l – длина средней линии магнитопровода. Ток намагничивания датчиком тока преобразуется в напряжение:

$$U_H = I_n(t)R = H(t) \frac{l}{w_1} R, \quad (5)$$

где R – сопротивление датчика тока.

Выходные сигналы измерительных каналов преобразуются в код N с помощью АЦП по формуле

$$N = \text{Ent} \left(\frac{X + 0,5q}{q} \right), \quad (6)$$

где X – выходной сигнал измерительных каналов (UB или UH); q – номинальная ступень квантования. Таким образом, идеальные функции преобразования измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля, приведенные к выходу, определяются выражениями (3), (6) и (5), (6) соответственно.

Заключение

В ходе проведенного исследования получены следующие основные результаты:

- разработаны структурные и функциональные модели измерительных каналов магнитной индукции и напряженности магнитного поля, которые дают удобный способ для анализа представленного метода измерения с метрологической точки зрения и упрощают получение функций преобразования измерительных каналов;
- получены аналитические выражения для расчета функций преобразования параметров магнитных материалов, которые позволяют выполнить расчет погрешности измерения.

Предложенные модели имеют ограничения. В частности, при выводе функций преобразования не учитывались потери на перемагничивание и нагрев магнитопровода, что может приводить к возникновению погрешностей. Учет этих факторов будет выполнен в ходе дальнейшей работы.

Список литературы

1. Мишин Д. Д. Магнитные материалы : учеб. пособие для студентов физических специальностей высш. учеб. заведений. М. : Высш. шк., 1981. 333 с.
2. Чечерников В. И. Магнитные измерения : учеб. для студентов вузов. М. : МГУ, 1969. 387 с.
3. Volik A. V., Pecherskaya E. A., Varenik Y. A. et al. Metrological aspects of an automated method for measuring electrophysical parameters of soft magnetic materials // Journal of Physics: Conference Series. «8th International School and Conference «Saint Petersburg OPEN 2021»: Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, SPbOPEN 2021». 2021. P. 012072.
4. Печерская Е. А., Бобошко А. В., Соловьев В. А. Методики принятия решений как составная часть интеллектуальной системы поддержки исследований материалов функциональной электроники // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2011. № 1. С. 229–231.
5. Печерская Е. А. Математические модели предметной области при исследовании параметров материалов нано- и микроэлектроники // Университетское образование : сб. ст. XV Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 50-летию полета первого космонавта Ю. А. Гагарина / под ред. В. И. Волчихина, Р. М. Печерской. Пенза, 2011. С. 436–438.
6. ЗАО «НПО Интротест» // Руководство по применению магнитоизмерительной установки МК-3Э. URL: https://vk.com/doc394867190_643848086?hash=6Zb2RSV4LdUP8a6Y199SptLDnrQfzyYjyIqkIaYnVck&dl=bZ6sP1cgSPK0MRRQ6GgelW57ZazRzodiPv63kDeIRZL (дата обращения: 03.10.2022).
7. Шлыков Г. П. Функциональный и метрологический анализ средств измерений и контроля : учеб. пособие. Пенза : ПГУ, 1998. 91 с.

References

1. Mishin D.D. *Magnitnye materialy: ucheb. posobie dlya studentov fizicheskikh spetsial'nostey vyssh. ucheb. zavedeniy = Magnetic materials: textbook for students of physical specialties of higher educational institutions*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:333. (In Russ.)
2. Chechernikov V.I. *Magnitnye izmereniya: ucheb. dlya studentov vuzov = Magnetic measurements : textbook for university students*. Moscow: MGU, 1969:387. (In Russ.)
3. Volik A.V., Pecherskaya E.A., Varenik Y.A. et al. Metrological aspects of an automated method for measuring electrophysical parameters of soft magnetic materials. *Journal of Physics: Conference Series*. «8th International School and Conference «Saint Petersburg OPEN 2021»: Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, SPbOPEN 2021». 2021:012072.
4. Pecherskaya E.A., Boboshko A.V., Solov'ev V.A. Decision-making methods as an integral part of the intellectual system for supporting research of functional electronics materials. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy = Innovations based on information and communication technologies*. 2011;(1):229–231. (In Russ.)
5. Pecherskaya E.A. Mathematical models of the subject area in the study of parameters of nano- and microelectronics materials. *Universitetskoe obrazovanie: sb. st. XV Mezhdunar. nauch.-metod. konf., posvyashch. 50-letiyu poleta pervogo kosmonavta Yu. A. Gagarina = University education : sat. art. XV International scientific method. conf., dedicated. 50th anniversary of the flight of the first cosmonaut Yu. A. Gagarin*. Penza, 2011:436–438. (In Russ.)
6. NPO Introtest CJSC. *Rukovodstvo po primeneniyu magnitoizmeritel'noy ustanovki MK-ZE = Guidelines for the use of the MK-ZE magnetic measuring unit*. (In Russ.). Available at: https://vk.com/doc394867190_643848086?hash=6Zb2RSV4LdUP8a6Y199SptLDnrQfzyYjyIqkIaYnVck&dl=bZ6sP1cgSPK0MRRQ6GgelW57ZazRzodiPv63kDeIRZL (accessed 03.10.2022).
7. Shlykov G.P. *Funktsional'nyy i metrologicheskiy analiz sredstv izmereniy i kontrolya: ucheb. posobie = Functional and metrological analysis of measuring and control instruments : textbook*. Penza: PGU, 1998:91. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

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)

Диана Евгеньевна Тузова

студентка,

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

E-mail: diana.tuzova.02@bk.ru

Diana E. Tuzova

Student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Павел Евгеньевич Голубков

инженер кафедры информационно-

измерительной техники и метрологии,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

Pavel E. Golubkov

Engineer 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 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 26.04.2022

Принята к публикации/Accepted 17.05.2022

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

УДК 621.331.3.025.3

doi:10.21685/2307-5538-2022-4-9

КОСВЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. Д. Семенов¹, С. В. Волков², С. Г. Исаев³, С. Е. Ларкин⁴, В. С. Чапаев⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹sad-50@mail.ru, ²rtech@pnzgu.ru, ³eltech@pnzgu.ru, ⁴eltech@pnzgu.ru, ⁵eltech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются электроприводы на основе асинхронного двигателя. Предметом исследования является косвенное измерение частоты вращения асинхронного двигателя в таких электроприводах. Целью исследования является построение наблюдателя частоты вращения асинхронного электропривода, позволяющего путем математического моделирования и последующей его настройки получать приемлемые оценки частоты вращения асинхронного двигателя. *Материалы и методы.* Для исследования косвенного измерения частоты вращения асинхронного двигателя использованы методы математического и компьютерного моделирования на базе программного комплекса Matlab для электропривода с асинхронным электродвигателем АИР112МА8, работающим на постоянную нагрузку. *Результаты.* Проведена настройка параметров наблюдателя частоты вращения ротора на компьютерной модели асинхронного двигателя АИР112МА8, результаты которой могут быть использованы для оценки частоты вращения асинхронного электропривода, работающего на заданную нагрузку. *Выводы.* Предложенный подход для оценки косвенного измерения частоты вращения ротора асинхронного двигателя может быть использован при проектировании и эксплуатации асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния частоты вращения.

Ключевые слова: косвенный метод измерения частоты вращения, уравнения наблюдателей потокосцепления и частоты вращения, Simulink-модель двигателя АИР112МА8, Simulink-модель электропривода, абсолютная погрешность оценки частоты вращения при косвенных измерениях с использованием наблюдателей состояния

Для цитирования: Семенов А. Д., Волков С. В., Исаев С. Г., Ларкин С. Е., Чапаев В. С. Косвенное измерение частоты вращения ротора асинхронного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 64–70. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-9

INDIRECT MEASUREMENT OF THE ROTOR SPEED OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

A.D. Semenov¹, S.V. Volkov², S.G. Isaev³, S.E. Larkin⁴, V.S. Chapaev⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

¹sad-50@mail.ru, ²rtech@pnzgu.ru, ³eltech@pnzgu.ru, ⁴eltech@pnzgu.ru, ⁵eltech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of research is electric drives based on an asynchronous motor. The subject of the study is the indirect measurement of the rotational speed of an asynchronous motor in such electric drives. The purpose of the study is to construct an observer of the rotational speed of an asynchronous electric drive, which allows, by mathematical modeling and subsequent tuning, to obtain acceptable estimates of the rotational speed of an asynchronous motor. *Materials and methods.* To study the indirect measurement of the rotational speed of an asynchronous motor,

methods of mathematical and computer modeling based on the Matlab software package of an electric drive with an AIR112MA8 asynchronous electric motor operating at a constant load were used. *Results.* The parameters of the rotor rotation frequency observer have been adjusted on a computer model of an AIR112MA8 asynchronous motor, the results of which can be used to estimate the rotation frequency of an asynchronous electric drive operating at a given load. *Conclusions.* The proposed approach for evaluating the indirect measurement of the rotational speed of the rotor of an asynchronous motor can be used in the design and operation of asynchronous electric drives with observers of the rotational speed state.

Keywords: indirect method of measuring the rotational speed, equations of flow coupling and rotational speed observers, Simulink-model of the AIR112MA8 engine, Simulink-model of the electric drive, absolute error in estimating the rotational speed with indirect measurements using state observers

For citation: Semenov A.D., Volkov S.V., Isaev S.G., Larkin S.E., Chapaev V.S. Ndirect measurement of the rotor speed of an asynchronous motor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):64–70. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-9

Введение

В настоящее время в системах электропривода получили широкое распространение косвенные методы измерения частоты вращения с использованием различных наблюдателей состояния [1, 2]. Сложность настройки наблюдателей конкретного электропривода для получения заданной точности измерения частоты вращения при проектировании различных вариантов асинхронных электроприводов делает тему предлагаемого исследования актуальной.

В данной статье приводятся результаты компьютерного моделирования асинхронного электропривода с наблюдателем состояния, позволяющие проводить настройку наблюдателя состояния для получения заданной погрешности этого измерения.

Краткое описание метода косвенного измерения частоты вращения

На основе уравнений обобщенной электрической машины [3, 4] в неподвижной системе координат α, β были получены уравнения наблюдателей потокосцеплений ротора, выведенные через параметры цепи статора и ротора:

$$\begin{cases} \Psi_{R\alpha}^S = \frac{1}{k_R} \left(\frac{(U_{S\alpha} - I_{S\alpha} R_S)}{p+1} - \sigma L_S I_{S\alpha} \right); \\ \Psi_{R\beta}^S = \frac{1}{k_R} \left(\frac{(U_{S\beta} - I_{S\beta} R_S)}{p+1} - \sigma L_S I_{S\beta} \right); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{R\alpha}}{dt} = \frac{1}{T_R} (L_m I_{S\alpha} - \Psi_{R\alpha}) - \omega_{eR} \Psi_{R\beta}; \\ \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} = \frac{1}{T_R} (L_m I_{S\beta} - \Psi_{R\beta}) + \omega_{eR} \Psi_{R\alpha}. \end{cases} \quad (2)$$

В уравнениях приняты следующие обозначения: L_m – главная индуктивность АД (индуктивность намагничивания); L_S – индуктивность рассеяния статора; $k_R = \frac{L_m}{L_S}$ – коэффициент

связи ротора; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_R}$ – коэффициент рассеяния; $T_R = \frac{L_R}{R_R}$ – постоянная времени ротора; L_R – индуктивность рассеяния ротора; R_S – сопротивление статора; R_R – сопротивление ротора; $\omega_{eR} = z_p \omega_R$ – частота вращения потокосцепления ротора; z_p – число пар полюсов; ω_R – частота вращения ротора.

Компьютерная Simulink-модель двигателя АИР112МА8

Моделировался электропривод с асинхронным двигателем АИР112МА8. Характеристики электродвигателя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики электродвигателя АИР112МА8

Тип электродвигателя	Мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об. / мин.	Ток статора, А	КПД, %	Коэф. мощности	$I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$	Масса, (IM1081), кг
АИР90L4	2,2	1500	5	81	0,83	6,5	15,0/15,1

В табл. 2 представлены параметры схемы замещения, полученные из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Таблица 2

Параметры Т-образной схемы замещения электродвигателя АИР112МА8

Активное сопротивление статора, Ом	Активное сопротивление ротора, Ом	Индуктивность статора, мГн	Индуктивность ротора, мГн	Индуктивность намагничивающего контура, мГн	Приведенный момент инерции, кгм ²
2,47	2,69	367	378	362	0,02

Формирование полной Simulink-модели электропривода

Формирование Simulink-модели электропривода осуществляется в соответствии с рекомендациями [5].

Представленным табличным данным и уравнениям (1) и (2) соответствуют следующие Simulink-модели.

Simulink-модель наблюдателей потокосцеплений ротора, полученная через параметры цепи статора (уравнения (1)), будет иметь вид, показанный на рис. 1.

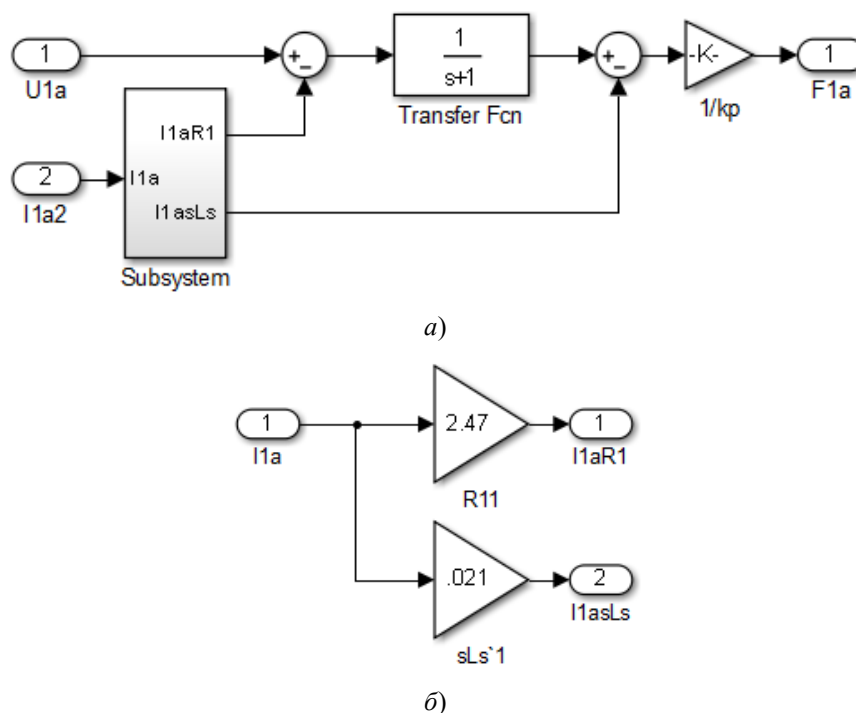


Рис. 1. Simulink-модель наблюдателей потокосцеплений ротора, полученная через параметры цепи статора

На рис. 1 приведена модель только первого уравнения системы (1). Модель второго уравнения будет аналогичная.

Simulink-модель наблюдателей потокосцеплений ротора, полученная через параметры цепи ротора (уравнения (2)), будет выглядеть, как показано на рис. 2.

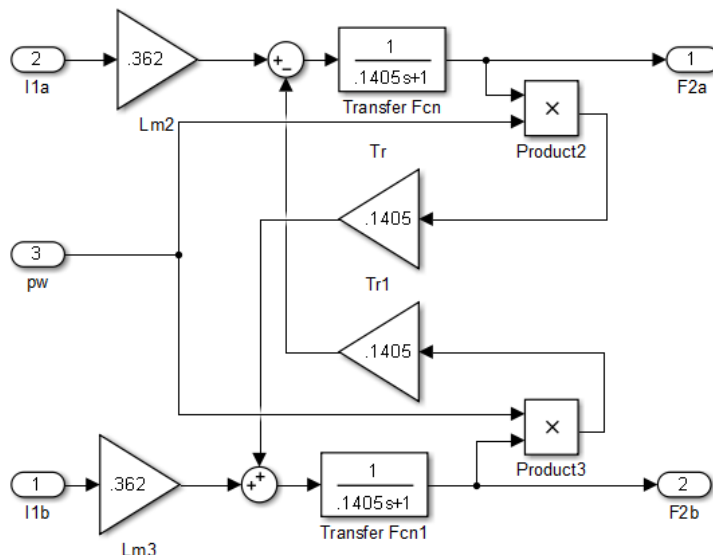


Рис. 2. Simulink-модель наблюдателей потокосцеплений ротора, полученная через параметры цепи ротора

Оценка частоты вращения ротора может быть получена из следующего уравнения. Это не что иное, как векторное произведение векторов потокосцеплений ротора, полученных по уравнениям (1) и (2):

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_{eR} - (\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S) = 0. \quad (3)$$

В уравнении (3) верхние индексы S и R соответствуют оценке потокосцеплений ротора, полученные, соответственно, через параметры цепи статора и ротора (уравнения (1) и (2)). Из уравнения (3) следует, что частоту вращения потокосцепления ротора ω_{eR} можно оценить по уравнению

$$\hat{\omega}_{eR} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) (\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S), \quad (4)$$

где K_p K_i – пропорциональная и интегральная составляющие ПИ-регулятора.

Объединяя вместе Simulink-модели наблюдателей потокосцеплений ротора, полученные через параметры цепи статора и ротора, и учитывая уравнение (4), получим структурную схему наблюдателя состояния переменных роторной цепи асинхронного двигателя (рис. 3).

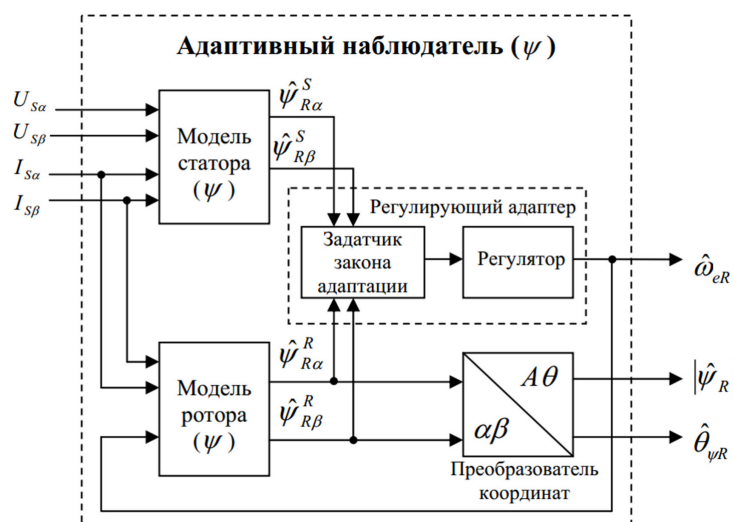


Рис. 3. Структурная схема наблюдателя переменных роторной цепи асинхронного двигателя

Полная Simulink-модель асинхронного двигателя с наблюдателями состояния приведена на рис. 4.

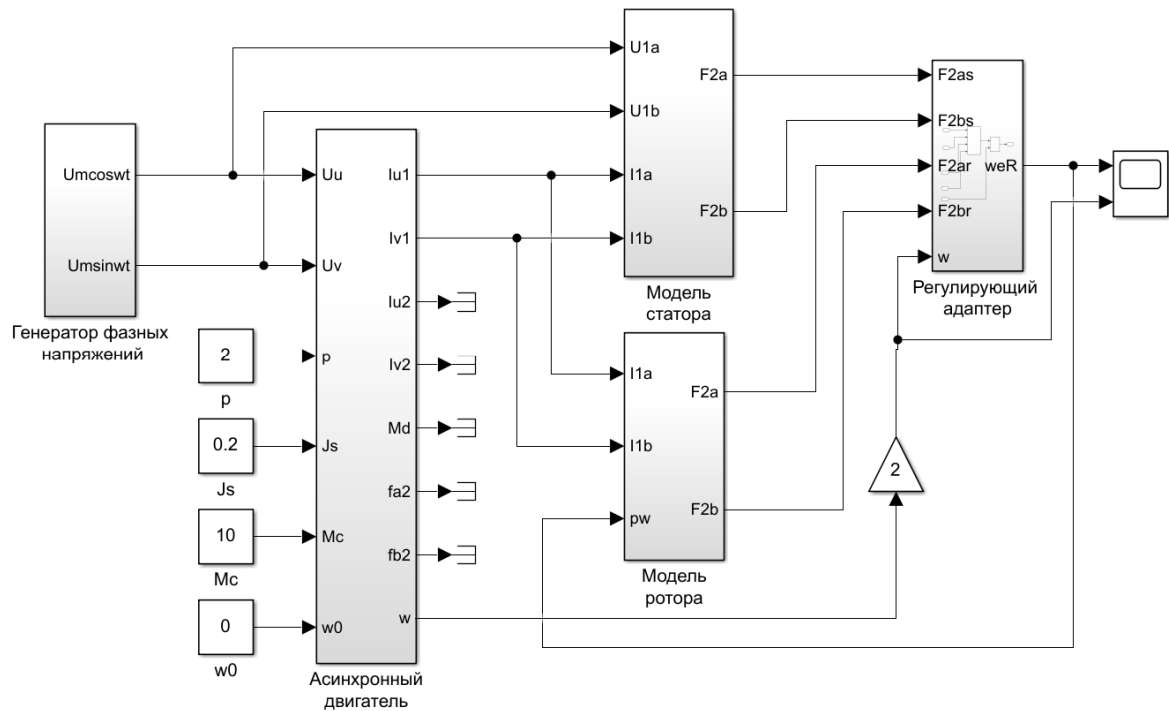


Рис. 4. Полная Simulink-модель асинхронного двигателя с наблюдателями состояния

Результаты моделирования электропривода с косвенным измерением частоты вращения

На рис. 5 показано изменение частоты вращения асинхронного двигателя при пуске под нагрузкой, полученное на выходах модели и наблюдателя состояния.

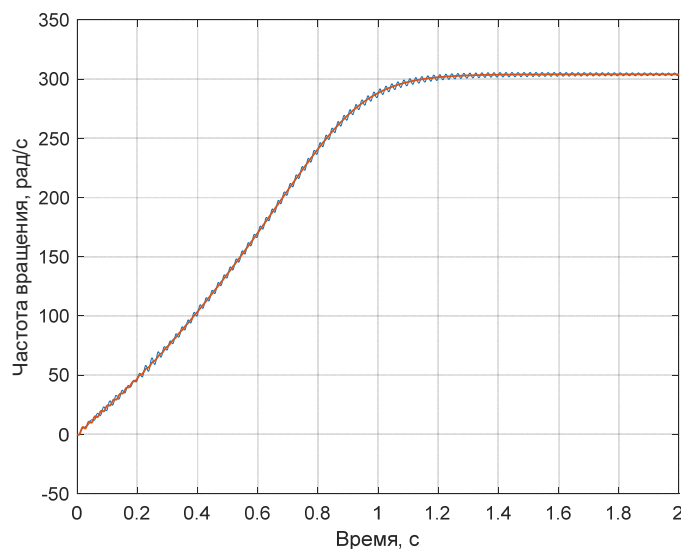


Рис. 5. Изменение частоты вращения асинхронного двигателя при пуске под нагрузкой (модель, наблюдатель состояния)

На рис. 6 показан график абсолютной ошибки наблюдателя состояния, из которого видно, что в результате настройки наблюдателя величина этой ошибки составляет не более ± 3 рад/с во всем диапазоне изменения скоростей, что вполне приемлемо для подавляющего числа общепромышленных электроприводов.

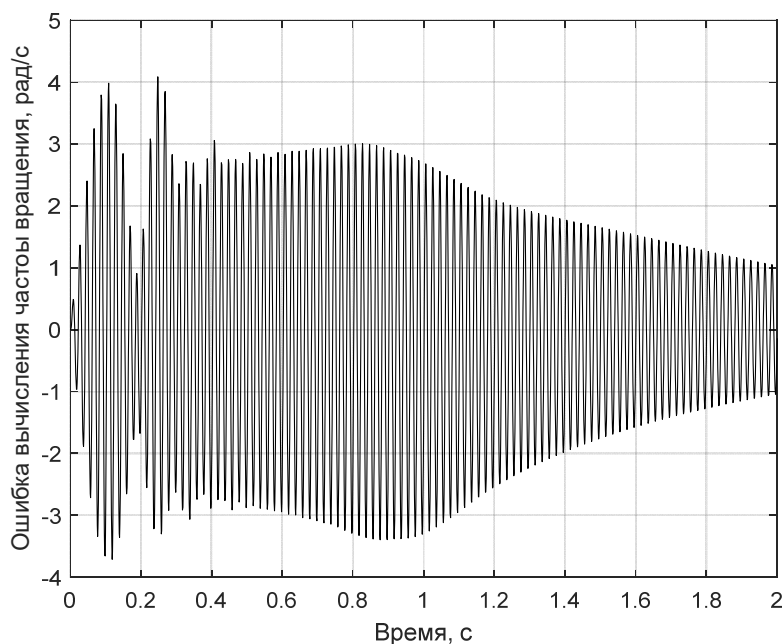


Рис. 6. Абсолютная ошибка наблюдателя состояния

Заключение

1. Показана возможность косвенного измерения частоты вращения асинхронного двигателя с использованием наблюдателей состояния.

2. Методом моделирования с последующей настройкой параметров наблюдателя удалось получить абсолютную погрешность измерения частоты вращения, не превышающую по абсолютному значению 3 рад/с.

3. Исследованный метод позволяет определять частоту вращения асинхронного электропривода с приемлемой для общепромышленных электроприводов точностью, измеряя напряжение и ток статора.

Список литературы

1. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново : Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2008. 298 с.
2. Калачев Ю. Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М., 2015. 60 с.
3. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учебник для вузов. М. : Академия, 2006. 272 с.
4. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. М. : Энергия, 1964. 312 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб. : КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

References

1. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka = Vector control of AC electric drives*. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V. I. Lenina, 2008:298. (In Russ.)
2. Kalachev Yu.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode = State observers in a vector electric drive*. Moscow, 2015:60. (In Russ.)
3. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem: uchebnik dlya vuzov = Alternating current electric drives with frequency regulation : textbook for universities*. Moscow: Akademiya, 2006:272. (In Russ.)
4. Uayt D., Vudson G. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii = Electromechanical energy conversion*. Moscow: Energiya, 1964:312. (In Russ.)
5. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK = Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC*. Saint Petersburg: KORONA-Vek, 2008:368. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Анатолий Дмитриевич Семенов**

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sad-50@mail.ru

Anatoly D. Semenov

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

Сергей Владимирович Волков

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

Sergey V. Volkov

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

Сергей Геннадьевич Исаев

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

Сергей Евгеньевич Ларкин

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

Вячеслав Сергеевич Чапаев

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

Vyacheslav S. Chapaev

Candidate of technical sciences,
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 21.04.2022

Поступила после рецензирования / Revised 23.05.2022

Принята к публикации / Accepted 27.06.2022

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

УДК 61.13058

doi:10.21685/2307-5538-2022-4-10

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ У ЛЮДЕЙ С ЭМОЦИОНАЛЬНЫМИ РАССТРОЙСТВАМИ

С. Ю. Тверская¹, А. Ю. Тычков², П. П. Чураков³, В. Н. Горбунов⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ tverskaya_sofya@mail.ru, ² tychkov-a@mail.ru, ³ churakov-pp@mail.ru, ⁴ ctt@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Ежедневно на каждого человека оказывает воздействие целая сумма факторов, имеющих эмоциональный и стрессовый характер, что может привести к появлению онкологических или сердечно-сосудистых заболеваний. Известно, что до 20 % населения мира подвержены тревоге и депрессии вне зависимости от расовой принадлежности, региона и уровня благосостояния. Целью работы является разработка и исследование оригинального алгоритма комплексной обработки и анализа электроэнцефалографических сигналов у людей в условиях эмоционального возбуждения. *Материалы и методы.* Для проведения исследований сформирована выборка испытуемых из 30 человек возрастом от 23 до 28 лет, давших добровольное согласие на проведение эксперимента в соответствии с протоколом клинического исследования. Измерение параметров электроэнцефалографических сигналов осуществлялось в спокойном состоянии, в естественной нагрузке и шести режимах аудиовизуальной стимуляции (sleep, learn, energ, create, fun, special). Для сравнения полученных результатов проведены численные методы анализа: амплитудный, спектральный и корреляционный. *Результаты и выводы.* В результате проведенных исследований выявлено, что в режиме аудиовизуальной стимуляции с открытыми глазами и energ регистрируется процесс возбуждения полушарий головного мозга, что свидетельствует о выраженной картине эмоционального состояния. В режимах sleep и fun регистрируется стабилизация эмоционального напряжения.

Ключевые слова: электроэнцефалографический сигнал, информативные параметры, контроль и коррекция, физиологическая активность

Для цитирования: Тверская С. Ю., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Горбунов В. Н. Разработка и исследование алгоритма комплексной обработки электроэнцефалографических сигналов у людей с эмоциональными расстройствами // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 71–79. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-10

DEVELOPMENT AND STUDY OF AN ALGORITHM FOR COMPLEX PROCESSING OF ELECTROENCEPHALOGRAPHIC SIGNALS IN PEOPLE WITH EMOTIONAL DISORDERS

S.Yu. Tverskaya¹, A.Yu. Tychkov², P.P. Churakov³, V.N. Gorbunov⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ tverskaya_sofya@mail.ru, ² tychkov-a@mail.ru, ³ churakov-pp@mail.ru, ⁴ ctt@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* Every day, every person is affected by a whole range of factors that are emotional and stressful in nature, which can lead to the appearance of oncological or cardiovascular diseases. It is known that up to 20 % of the world's population is prone to anxiety and depression, regardless of race, region and wealth level. The aim of the work is

to develop and study an original algorithm for the complex processing and analysis of electroencephalographic signals in people under conditions of emotional arousal. *Materials and methods.* For the research, a sample of 30 subjects, aged from 23 to 28 years, was formed, who gave their voluntary consent to the experiment in accordance with the protocol of the clinical trial. Measurement of electroencephalographic signals parameters was carried out in a calm state, in a natural load and six modes of audiovisual stimulation (sleep, learn, energy, create, fun, special). To compare the obtained results, numerical methods of analysis were carried out: amplitude, spectral and correlation. *Results and conclusions.* As a result of the research, it was found that in the audiovisual stimulation mode with open eyes and energy, the process of excitation of the cerebral hemispheres is recorded, which indicates a pronounced picture of the emotional state. In the sleep and fun modes, stabilization of emotional stress is recorded.

Keywords: electroencephalographic signal, informative parameters, control and correction, physiological activity

For citation: Tverskaya S.Yu., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Gorbunov V.N. Development and study of an algorithm for complex processing of electroencephalographic signals in people with emotional disorders. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):71–79. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-10

Введение

Расстройства тревожно-депрессивного спектра, вызванные стрессом, являются наиболее распространенными заболеваниями в мире. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ, 2014), тревоге и депрессии подвержены 15–25 % населения мира вне зависимости от расовой принадлежности, региона и уровня благосостояния [1]. По данным Министерства здравоохранения РФ, за последние 10 лет эмоциональные расстройства становятся предвестниками онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний. В то же время главными проблемами при лечении и коррекции эмоциональных расстройств являются малоизученная их нейробиологическая природа, устойчивость к терапии, хронический характер и отсутствие эффективных физиотерапевтических средств лечения [2].

Начиная с 2010 г. четко наблюдается динамика по увеличению уровня эмоциональных расстройств населения с 3 до 8 % [3]. Чаще других с этим недугом сталкиваются женщины или молодежь в возрасте от 18 до 24 лет. При этом за помощью к друзьям или близким в поисках выхода из депрессивного состояния обращаются 58 % пациентов, 42 % – сами ищут выход из проблемной ситуации, 12 % – обращаются за помощью к психологу или психиатру, 9 % – занимаются самоуспокоением, а 7 % – используют успокоительные фармакологические средства.

Анализ объекта исследования

Эмоциональное расстройство называется любым психологическим расстройством, характеризующимся необычной реакцией человека (организма), которое неуместно или несоизмеримо его причине [4, 5]. Исследование головного мозга позволяет понять этиологию заболевания, выявить причину и реакцию организма на эмоциональное расстройство, а также позволяет подобрать способ реабилитации и лечения.

Исследования мозга обширны и не ограничиваются исследованиями эмоциональных расстройств [5–8]. Мозг человека и механизмы его деятельности привлекают внимание исследователей самых разных научных коллективов и направлений исследования [9, 10].

Оценить поведение работы головного мозга возможно по его электрической активности. Достаточное количество работ направлено на исследование ЭЭС [11, 12]. Электрическая активность головного мозга регистрируется на электроэнцефалографическом сигнале (ЭЭС) и представляет собой колебания разности потенциалов между двумя точками на поверхности головы обследуемого [13]. На каждый канал регистрации подаются напряжения, которые формируются двумя электродами: положительным и отрицательным.

ЭЭС представляется совокупностью следующих ритмов [14]:

– дельта-ритм, его частота 0,5–3 Гц. Дельта-ритм наблюдается в состоянии покоя, при некоторых формах стресса и при длительной умственной работе. Этот ритм также характерен для стадии глубокого сна без сновидений;

– тета-ритм, его частота 4–6 Гц. Данный частотный диапазон наблюдается при глубокой релаксации головного мозга, способствует хорошей памяти и быстрому усвоению информации;

– альфа-ритм, частота ритма составляет 8–13 Гц, амплитуда достигает 100 мкВ. Альфа-ритм является самым информативным при анализе ЭЭГ. Он более выражен в затылочных отделах головного мозга. В направлении лобных отделов его амплитуда уменьшается. Большую амплитуду альфа-ритма регистрируют в состоянии расслабленного бодрствования, при закрытых глазах;

– бета-ритм, частота составляет 14–35 Гц. Регистрируется при активном состоянии человека. Бета-ритм выражен в лобных областях, при этом в зависимости от вида деятельности (интенсивной) резко усиливается и распространяется на другие области мозга;

– гамма-ритм – это часть бета-диапазона в интервале 30–40 Гц, амплитуда составляет 2–10 мкВ. Гамма-ритм проявляется при решении задач, требующих максимального сосредоточения.

Следует отметить, что известные ритмы не всегда регистрируются одновременно на ЭЭС у каждого человека, что связано с его физической и физиологической восприимчивостью окружающего мира. Таким образом, регистрация данных посредством электроэнцефалографии является достаточно точным и в то же время сложным методом принятия решения об уровне эмоционального расстройства у человека путем анализа отдельных его ритмов. Требуется совершенствование и разработка новых методов и алгоритмов цифровой обработки ЭЭС и принятия решения.

Анализ предмета исследования

В настоящее время для восстановления эмоционального расстройства человека применяются различные приборы внешнего воздействия: вибрационные, акустические, оптические и их комбинации. Самыми распространенными являются приборы аудиовизуального воздействия, сочетающие в себе одновременно оптические и акустические методы воздействия на организм.

Аудиовизуальная стимуляция (АВС) [15, 16] является методом управления состоянием человека (уровнем бодрствования, состоянием сознания) с помощью комбинации ритмов, тонов определенной высоты и музыкальных звуковых стимулов с калейдоскопическими эффектами световой стимуляции.

Известно, что здоровый мозг обладает способностью следовать навязчивым ритмам. Эта способность может быть использована для «перевода» мозга из одного стрессового состояния в другое (из депрессивного в позитивное или наоборот). Целью метода АВС является формирование «навязанной» биоэлектрической активности головного мозга через стимуляцию сенсорных (слух, зрение) входов раздражителями.

В работе [17] отмечается, что метод АВС применяется в лечении тикозных гиперкинезов и поведенческих отклонений у детей. После курса АВС у детей отмечается положительная динамика лечения, а также повышается уровень развития внимания. В работе [18] метод АВС используется для профилактики переутомления у студентов. По результатам эксперимента выявлено повышение качества внимания у студентов.

Таким образом, метод АВС предлагается применять для проведения коррекции эмоционального состояния человека по результатам обработки ЭЭС. Данные исследования проводятся в соответствии с протоколом клинического исследования, утвержденного на заседании локального комитета по этике ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет».

Алгоритм комплексной обработки ЭЭС

Разработанный авторами алгоритм комплексной обработки ЭЭС и коррекции эмоционального состояния человека (рис. 1) позволяет повысить достоверность определения и коррекции диагностических показателей эмоциональных расстройств на ЭЭС.

Для проведения исследований сформирована выборка испытуемых из 30 человек, возрастом от 23 до 28 лет. Коррекция эмоциональных состояний приводилась за счет внешнего воздействия прибором Novo Pro 100 в базе лаборатории «Биомедицинские и когнитивные технологии» Пензенского государственного университета. Каждому испытуемому проведено восемь измерений, в том числе: измерение параметров на ЭЭС в спокойном состоянии (с закрытыми глазами), в естественной нагрузке (с открытыми глазами) и в шести режимах воздействия (Sleep, Learn, Energ, Create, Fun, Special). Снятие показаний проводилось в двух точках лобных долей головного мозга.

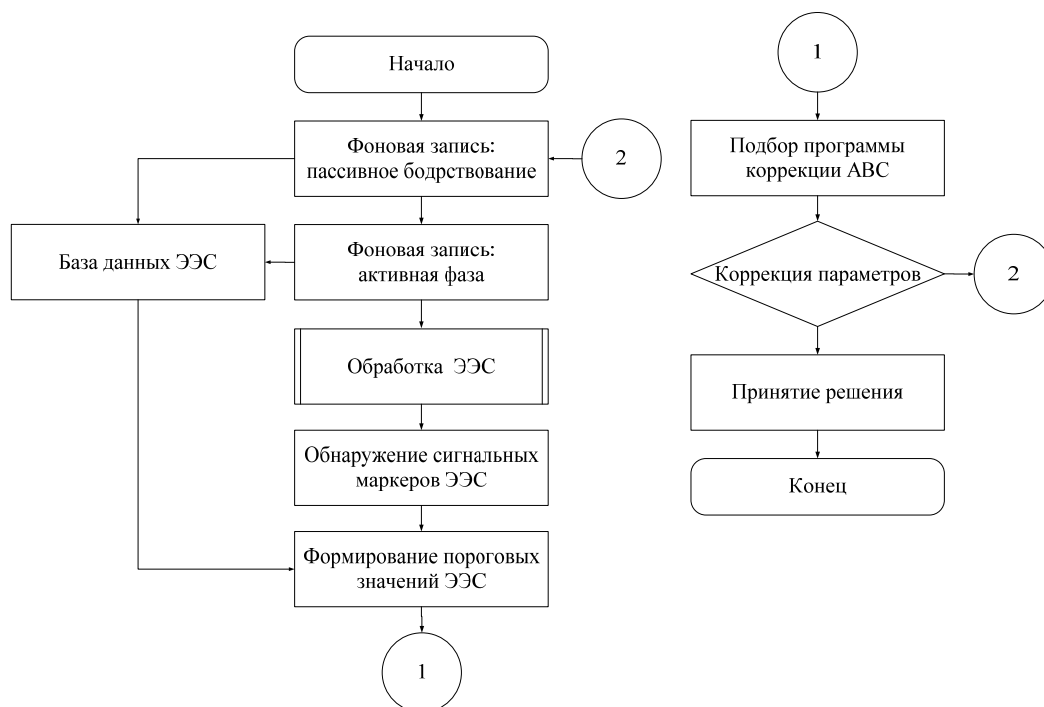


Рис. 1. Алгоритм комплексной обработки ЭЭС и ABC у пациентов с эмоциональными расстройствами

Для сравнения полученных результатов проведены численные методы анализа: амплитудный, спектральный и корреляционный.

Результаты амплитудного анализа по различным ритмам (дельта-ритм, тета-ритм, альфа-ритм, бета-НЧ-ритм, бета-ВЧ-ритм) приведены в табл. 1. В таблице приведены средние значения амплитуды ритмов в мкВ для всех испытуемых по двум отведениям (EEG FP1-A1, EEG FP1-A2). Отмечается, что в спокойном состоянии (открытые глаза) и в режиме Eng значение дельта-ритма превалирует в сравнении с другими ритмами и режимами воздействия, что составляет 20 мкВ. В этом случае отмечается высокий уровень эмоционального возбуждения. Тогда как в режиме Fun и Sleep наблюдается самое низкое значение амплитуды в бета-ВЧ и НЧ ритмах 1–2 мкВ, что характерно для проявления у испытуемого положительных эмоций и нормализации физиологического состояния. В этих же режимах также наблюдается значительное снижение значений амплитуд дельта-ритма.

Таблица 1

Амплитудный анализ ЭЭС

Состояние регистрации	Отведения	Разновидности ритмов, мкВ				
		Дельта	Тета	Альфа	Бета-НЧ	Бета-ВЧ
Открытые глаза	EEG FP1-A1	22	5	10	3	4
	EEG FP2-A2	21	4	11	3	4
Закрытые глаза	EEG FP1-A1	5	6	6	3	4
	EEG FP2-A2	5	6	5	4	4
Режим Sleep	EEG FP1-A1	4	5	9	1	2
	EEG FP2-A2	5	6	12	1	2
Режим Learn	EEG FP1-A1	15	5	7	4	5
	EEG FP2-A2	11	5	11	3	7
Режим Energ	EEG FP1-A1	22	3	9	3	5
	EEG FP2-A2	20	4	13	3	7
Режим Create	EEG FP1-A1	7	4	8	3	4
	EEG FP2-A2	5	4	14	3	5
Режим Fun	EEG FP1-A1	5	4	8	1	2
	EEG FP2-A2	4	3	15	2	2
Режим Special	EEG FP1-A1	7	5	6	3	5
	EEG FP2-A2	4	4	10	4	5

Для большинства испытуемых в условиях различного воздействия наблюдается значительное увеличение значений амплитуд в альфа диапазоне волн правого полушария (рис. 2). Тогда как бета-НЧ для обоих полушарий является относительно стабильным, что позволяет сделать вывод о положительном воздействии системы Novo Pro 100 для восстановления психоэмоционального состояния.

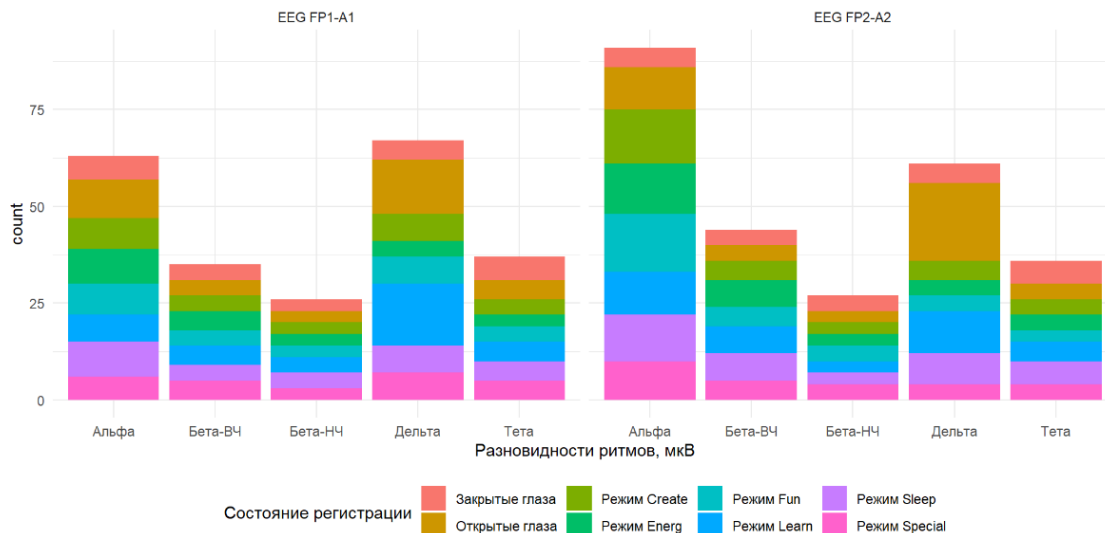


Рис. 2. Сравнение амплитуд ритмов волн обоих полушарий

По результатам амплитудного анализа также сделан вывод, что отдельные доли головного мозга наиболее активно реагируют на стимулы в определенных режимах (рис. 3). В режимах с открытыми глазами и Learn активно задействовано правое полушарие мозга. Близость значений активности правого полушария в режимах с открытыми глазами и Learn свидетельствуют о том, что восприятие информации испытуемыми осуществляется больше правым полушарием. Различия в показателях активности левого полушария объясняются отсутствием вербальной, цифровой и логической информации в режиме Learn у испытуемых.

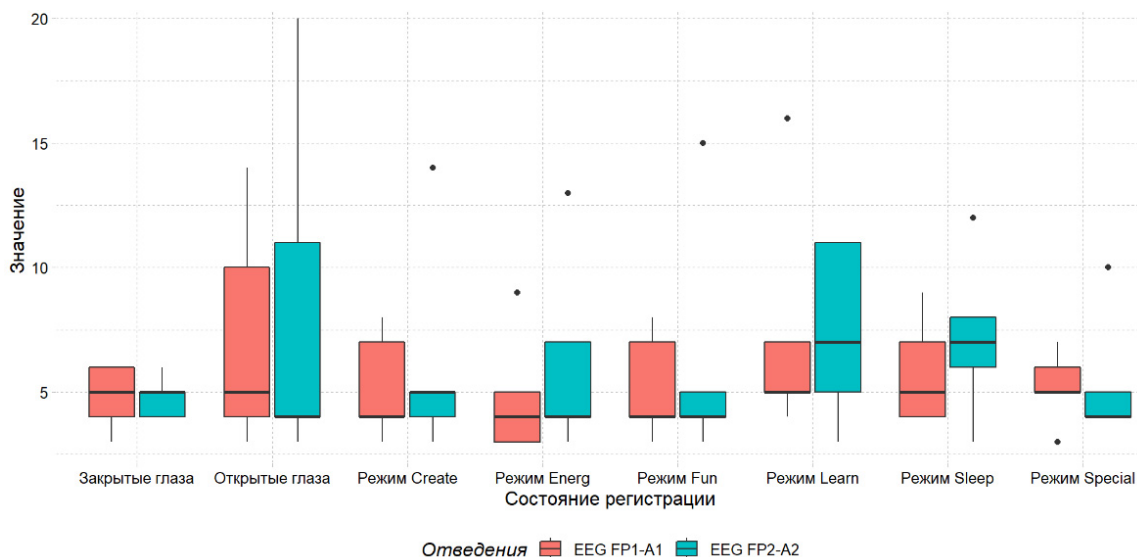


Рис. 3. Активность лобных отведений

В результате спектрального анализа [19] вычислены усредненные показатели мощности ЭЭС по всем экспериментам с выделением нормализованных значений (табл. 2): минимальная, максимальная и средняя амплитуды, доминирующая частота, средняя частота. Спектральный анализ ЭЭС позволяет выявить области с преобладанием определенной формы активности головного мозга, которая отражает баланс процессов возбуждения и торможения.

В результате анализа регистрируется значительное превышение максимальной амплитуды сигналов в режиме с открытыми глазами и Energ, тогда как в режиме Sleep данный показатель у большинства испытуемых снижается на порядок. Кроме того, среднее значение частоты для режимов с открытыми глазами и Energ также значительно выше в сравнении с другими режимами. Данные результаты позволяют сделать вывод о высоком уровне эмоционального возбуждения человека до обследования и стабилизации его состояния с применением отдельных его режимов.

Таблица 2

Спектральный анализ ЭЭС

Состояние регистрации	Отведения	Мин. ампл., мкВ	Макс. ампл., мкВ	Ср. ампл., мкВ	Доминир. частота, Гц	Ср. частота, Гц
Открытые глаза	EEG FP1-A1	0,04	13,35	0,74	0,74	13,07
	EEG FP2-A2	0,02	15,87	0,83	0,74	12,34
Закрытые глаза	EEG FP1-A1	0,02	3,01	0,44	0,62	7,96
	EEG FP2-A2	0,03	3,99	0,48	0,87	8,09
Режим Sleep	EEG FP1-A1	0,07	1,79	0,60	0,62	2,52
	EEG FP2-A2	0,06	2,41	0,66	0,62	2,15
Режим Learn	EEG FP1-A1	0,07	5,54	0,60	0,62	5,52
	EEG FP2-A2	0,07	5,96	0,67	0,74	5,39
Режим Energ	EEG FP1-A1	0,04	13,85	0,43	0,87	11,04
	EEG FP2-A2	0,02	15,81	0,48	0,65	12,29
Режим Create	EEG FP1-A1	0,09	5,26	0,56	0,62	6,01
	EEG FP2-A2	0,07	5,03	0,61	0,62	6,37
Режим Fun	EEG FP1-A1	0,08	2,48	0,54	0,62	2,62
	EEG FP2-A2	0,08	2,48	0,60	0,62	2,86
Режим Special	EEG FP1-A1	0,07	4,26	0,52	0,74	6,74
	EEG FP2-A2	0,08	4,59	0,56	0,74	6,86

В результате корреляционного анализа ЭЭС [20, 21] отмечается высокая положительная корреляция исследуемых сигналов в различных ритмах и отведениях, что означает синфазность или синхронность изменения двух сигналов. Высокая отрицательная корреляция означает синхронную противофазность ЭЭС, когда увеличению одного сигнала соответствует уменьшение другого. При асинхронном изменении сигналов корреляция близка к нулю. Результаты корреляционного анализа ЭЭС приведены в табл. 3, включающей следующие основные параметры: средняя частота автокорреляционной функции (АКФ), максимальный интервал значений, максимальный и средний размах, коэффициент автокорреляции.

Таблица 3

Корреляционный анализ ЭЭС

Состояние регистрации	Отведения	Ср. частота АКФ, Гц	Макс. интервал, мс	Макс. размах, мкВ	Ср. размах, мкВ	Коэфф. автокорреляции
Открытые глаза	EEG FP1-A1	19,2	316	2,9	2,0	0,73
	EEG FP2-A2	18,7	304	4,2	2,5	0,75
Закрытые глаза	EEG FP1-A1	12,2	374	0,3	0,0	0,25
	EEG FP2-A2	5,7	372	0,3	0,1	0,31
Режим Sleep	EEG FP1-A1	15,2	322	0,1	0,1	0,55
	EEG FP2-A2	15,2	302	0,09	0,1	0,50
Режим Learn	EEG FP1-A1	0,0	310	1,4	2,4	0,64
	EEG FP2-A2	16,6	302	0,7	0,2	0,64
Режим Energ	EEG FP1-A1	19,4	228	2,2	2,2	0,50
	EEG FP2-A2	20,6	212	2,4	2,0	0,56
Режим Create	EEG FP1-A1	11,4	198	0,2	0,1	0,61
	EEG FP2-A2	13,6	236	0,4	0,2	0,61
Режим Fun	EEG FP1-A1	12,5	306	0,2	0,0	0,38
	EEG FP2-A2	11,2	134	0,1	0,1	0,54
Режим Special	EEG FP1-A1	11,0	210	0,4	0,0	0,38
	EEG FP2-A2	11,3	228	0,3	0,1	0,52

Из таблицы видно, что в режиме с открытыми глазами и Energ среднее значение АКФ значительно выше в сравнении с другими режимами. В свою очередь, максимальный и средний размах амплитуды в режимах Sleep и Fun значительно ниже в сравнении с идентичными показателями других режимов.

Таким образом, в работе представлены три вида математического анализа ЭЭС: амплитудный, спектральный и корреляционный, каждый из которых подтвердил возможность регистрации эмоционального расстройства человека в режиме с открытыми глазами и режиме Energ, а также стабилизацию состояния здоровья посредством ABC в режиме Sleep и Fun.

Заключение

Эмоциональное возбуждение или торможение являются неотъемлемыми состояниями жизни каждого человека в различные периоды его жизни и развития. Тому способствуют внешние и внутренние факторы, как положительные, так и отрицательные. Оперативный контроль эмоционального состояния позволит вовремя принять превентивные меры и стабилизировать здоровье. Регистрация и анализ ЭЭС позволяют наиболее точно ответить на вопрос о наличии или отсутствии явного или скрытого возбужденного состояния. В работе проведен анализ отдельных ритмов ЭЭС испытуемых в различных состояниях воздействия на человека посредством ABC. Результаты исследования показали, что в режиме с открытыми глазами и Energ четко регистрируется процесс возбуждения полушарий головного мозга, что свидетельствует о явной картине эмоционального состояния. В то же время применение режимов Sleep и Fun на ЭЭС регистрировало обратную картину – стабилизацию высокого эмоционального напряжения.

Представленные результаты позволяют сделать общие выводы о положительном влиянии метода ABC на организм человека в период высокой эмоциональной нагрузки. В то же время авторами настоящей статьи планируется продолжить и расширить данные исследования путем классификации испытуемых на группы с положительными и отрицательными эмоциями и подбором индивидуальных, исходя из результатов обработки и анализа ЭЭС, режимов аудиовизуального воздействия.

Список литературы

1. Ronald K., Paul G. The economic burden of anxiety and stress disorders // *Neuropsychopharmacology: The Fifth Generation of Progress*. 2002. № 6. P. 981–992.
2. Sartori S. B., Singewald N. Novel pharmacological targets in drug development for the treatment of anxiety and anxiety-related disorders // *Pharmacology and Therapeutics*. 2019. Vol. 204.
3. Жизнь в стрессе: масштаб проблемы и пути решения // ВЦИОМ. 2019. URL: www.wciom.ru
4. Иржаев Д. И., Цветкова А. Н. Здоровье здоровых людей: DBS – подход к развитию возможностей мозга человека // *Инженерно-физические проблемы новой техники : сб. материалов XIV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвящ. 85-летию со дня рождения заслуженного работника ВШ РФ, д-ра физ.-мат. наук, проф. М. И. Киселева*. М., 2020. С. 223–227.
5. Попов Д. В. Человек ошибающийся и большие данные: от головного мозга к искусственному интеллекту // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2019. № 2. С. 89–96.
6. Князев Г. Г., Бочаров А. В., Савостьянов А. Н., Левин Е. А. Связь черт личности, культурных ценностей и коннективности дефолт-системы мозга с оценкой себя и других людей // *Психологический журнал*. 2021. Т. 42, № 2. С. 5–14.
7. 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.
8. Начарова М. А., Махин С. А., Павленко В. Б. Оценка реактивности и локализации частотных компонентов альфа-ритма ЭЭГ при выполнении и наблюдении движений // *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*. 2019. Т. 105, № 3. С. 311–326.
9. Шемякина Н. В., Нагорнова Ж. В. Действительно ли инструкция «Быть оригинальным и придумать» влияет на ЭЭГ-корреляты выполнения творческих задач? // *Физиология человека*. 2020. Т. 46, № 6. С. 5–15.
10. Кулаичев А. П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика. Изд. 4-е, перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2007. 640 с.
11. Солкин А. А. Современные методы анализа ЭЭГ у пациентов с патологией центральной нервной системы // *Достижения фундаментальной, клинической медицины и фармации : материалы 71-й науч. сессии сотр. ун-та (27–28 января 2016 г.)*. Витебск : ВГМУ, 2016. С. 359–360.
12. Сахаров В. Л., Андреев А. С. Методы математической обработки электроэнцефалограмм. Таганрог : Антон, 2000. 45 с.

13. Шейхова А. Н. Основные методы исследования головного мозга: ЭЭГ, КТ, ПЭТ, МРТ – их преимущества и отличительные признаки // РФ Академическая публицистика. 2021. № 7. С. 223–234.
14. Лабанов Д. Д. Об использовании метода комплексной аудиовизуальной стимуляции в программе коррекции личности осужденных // Ведомости уголовно-исполнительной системы. 2018. С. 68–71.
15. Федотчев А. И., Парин С. Б., Полевая С. А., Земляная А. А. Эффекты аудио-визуальной стимуляции, автоматически управляемой биопотенциалами мозга и сердца человека // Физиология человека. 2019. Т. 45, № 5. С. 75–79.
16. Зыков В. П., Иванов Л. Б., Будкевич А. В. Метод аудиовизуальной стимуляции в лечении тикозных гиперкинезов и синдрома дефицита внимания у детей // Альманах клинической медицины. 2006. № 13. С. 79–81.
17. Пац Н. В., Горюнова В. Е. Профилактика переутомления у студентов с использованием аудиовизуальной стимуляции // Современные проблемы гигиены, радиационной и экологической медицины. 2018. № 8. С. 90–98.
18. Кулаичев А. П. Метрологическое исследование спектральных оценок амплитуды ЭЭГ // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 11-1. С. 55–66.
19. Мамедов А. М., Джафарова А. М. Системный анализ гипоталамо-кортикальных кросскорреляционных ЭЭГ взаимоотношений при формировании условных эмоционально-негативных реакций // Журнал теоретической, клинической и экспериментальной морфологии. 2019. Т. 2. С. 65–72.
20. Кулаичев А. П. Метод анализа корреляционной синхронности ЭЭГ и его возможности // Журнал высшей нервной деятельности. 2011. Т. 61, № 4. С. 485–498.

References

1. Ronald K., Paul G. The economic burden of anxiety and stress disorders. *Neuropsychopharmacology: The Fifth Generation of Progress*. 2002;(6):981–992.
2. Sartori S.B., Singewald N. Novel pharmacological targets in drug development for the treatment of anxiety and anxiety-related disorders. *Pharmacology and Therapeutics*. 2019;204.
3. Life under stress: the scale of the problem and solutions. *VTsIOM = VTsIOM*. 2019. (In Russ.). Available at: www.wciom.ru
4. Irzhaev D.I., Tsvetkova A.N. Health of healthy people: a DBS approach to the development of human brain capabilities. *Inzhenerno-fizicheskie problemy novoy tekhniki: sb. materialov XIV Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 85-letiyu so dnya rozhdeniya zasluzhennogo rabotnika VSh RF, d-ra fiz.-mat. nauk, prof. M.I. Kiseleva = Engineering and physical problems of new technology : collection of Materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical conf. with the international participation, dedication. 85th anniversary of the birth of the Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, prof. M. I. Kiseleva*. Moscow, 2020:223–227. (In Russ.)
5. Popov D.V. A mistaken person and big data: from the brain to artificial intelligence. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Intelligence. Innovation. Investment*. 2019;(2):89–96. (In Russ.)
6. Knyazev G.G., Bocharov A.V., Savost'yanov A.N., Levin E.A. Connection of personality traits, cultural values and connectivity of the default brain system with the assessment of oneself and other people. *Psikhologicheskij zhurnal = Psychological Journal*. 2021;42(2):5–14. (In Russ.)
7. Tychkov A.Yu., Ageykin A.V., Alimuradov A.K. et al. Analysis and evaluation of signaling systems of diagnostics of borderline mental disorders. *Biotehnosfera = Biotechnosphere*. 2017;(1):35–39. (In Russ.)
8. Nacharova M.A., Makhin S.A., Pavlenko V.B. Evaluation of reactivity and localization of frequency components of the alpha rhythm of the EEG when performing and observing movements. *Rossiyskiy fiziologicheskij zhurnal im. I.M. Sechenova = Russian Physiological Journal named after I. M. Sechenov*. 2019;105(3):311–326. (In Russ.)
9. Shemyakina N.V., Nagornova Zh.V. Does the instruction "Be original and invent" really affect the EEG correlates of performing creative tasks? *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*. 2020;46(6):5–15. (In Russ.)
10. Kulaihev A.P. *Komp'yuternaya elektrofiziologiya i funktsional'naya diagnostika. Izd. 4-e, pererab. i dop. = Computer electrophysiology and functional diagnostics. 4th ed., rev. and suppl.* Moscow: INFRA-M, 2007:640. (In Russ.)
11. Solkin A.A. Modern methods of EEG analysis in patients with pathology of the central nervous system. *Dostizheniya fundamental'noy, klinicheskoy meditsiny i farmatsii: materialy 71-y nauch. sessii sotr. un-ta (27–28 yanvarya 2016 g.) = Achievements of fundamental, clinical medicine and pharmacy : materials of the 71st Scientific. sessions of the Department (January 27-28, 2016)*. Vitebsk: VGMU, 2016:359–360. (In Russ.)
12. Sakharov V.L., Andreenko A.S. *Metody matematicheskoy obrabotki elektroentsefalogramm = Methods of mathematical processing of electroencephalograms*. Taganrog: Anton, 2000:45. (In Russ.)
13. Sheykhova A.N. Basic methods of brain research: EEG, CT, PET, MRI – their properties and distinctive features. *RF Akademicheskaya publitsistika = RF Academic journalism*. 2021;(7):223–234. (In Russ.)

14. 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 = Sheets of the penal enforcement system*. 2018:68–71. (In Russ.)
15. Fedotchev A.I., Parin S.B., Polevaya S.A., Zemlyanaya A.A. Effects of audio-visual stimulation automatically controlled by biopotentials of the human brain and heart. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*. 2019;45(5):75–79. (In Russ.)
16. Zykov V.P., Ivanov L.B., Budkevich A.V. Method of audiovisual stimulation in the treatment of tic hyperkinesia and attention deficit syndrome in children. *Al'manakh klinicheskoy meditsiny = Almanac of clinical medicine*. 2006;(13):79–81. (In Russ.)
17. Pats N.V., Goryunova V.E. Prevention of overwork in students using audiovisual stimulation. *Sovremennye problemy gigieny, radiatsionnoy i ekologicheskoy meditsiny = Modern problems of hygiene, radiation and environmental medicine*. 2018;(8):90–98. (In Russ.)
18. Kulaichev A.P. Metrological study of spectral estimates of EEG amplitude. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk = Actual problems of humanities and natural sciences*. 2016;(11-1):55–66. (In Russ.)
19. Mamedov A.M., Dzhafarova A.M. Systemic analysis of hypothalamic-cortical cross-correlation EEG relationships in the formation of conditional emotional-negative reactions. *Zhurnal teoreticheskoy, klinicheskoy i eksperimental'noy morfologii = Journal of theoretical, clinical and experimental morphology*. 2019;2:65–72. (In Russ.)
20. Kulaichev A.P. Method of analysis of correlation synchronicity of the EEG and its possibilities. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti = Journal of Higher nervous activity*. 2011;61(4):485–498. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Софья Юрьевна Тверская

инженер кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tverskaya_sofya@mail.ru

Sofia Yu. Tverskaya

Engineer of the sub-department of radio
engineering and radioelectronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Alexander Yu. Tychkov

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

Петр Павлович Чураков

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

Petr P. Churakov

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

Валерий Николаевич Горбунов

кандидат экономических наук, доцент,
директор Научно-исследовательского института
фундаментальных и прикладных исследований,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ctt@pnzgu.ru

Valery N. Gorbunov

Candidate of economical sciences,
associate professor, director of the Research
Institute for Fundamental and Applied Research,
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 04.04.2022

Поступила после рецензирования / Revised 13.05.2022

Принята к публикации / Accepted 14.06.2022

НОВЫЙ ПОДХОД СЕГМЕНТАЦИИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА

А. К. Алимуратов¹, А. Ю. Тычков², П. П. Чураков³, Д. С. Дудников⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹alansapfir@yandex.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³churakov.pp@gmail.com, ⁴dmitriy.s.gmpf@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Точность сегментации речевых сигналов напрямую зависит от параметров, используемых для определения границ начала и окончания информативных фрагментов в слитном потоке речи. Целью работы является повышение эффективности сегментации «речь/пауза» за счет частотно-временного анализа речевых сигналов. Объектом исследования являются параметры, описывающие характеристики речи в частотной и временной областях. Предметом исследования является релевантность информативных параметров речевых сигналов задаче сегментации «речь/пауза». *Материалы и методы.* В работе использовались методы кратковременного анализа спектральных и энергетических характеристик речи на основе дискретного преобразования Фурье и энергетического оператора Тигера. Программная реализация предлагаемого способа была выполнена в среде математического моделирования © Matlab (MathWorks). *Результаты.* Предложен новый оригинальный подход сегментации «речь/пауза» на основе анализа значений средней частоты (в частотной области) и кратковременной энергии функции оператора Тигера (во временной области). Уникальностью предлагаемого подхода является вспомогательный алгоритм исправления ошибок сегментации «речь/пауза», разработанный на основе физиологических особенностей функционирования органов речевого аппарата при формировании слитного потока речи. Представлено краткое описание информативных параметров речевых сигналов, используемых для сегментации «речь/пауза» и подробно описан функционал предлагаемого подхода. Проведено исследование предлагаемого подхода на чистых и зашумленных речевых сигналах в сравнении с известными способами сегментации «речь/пауза». *Выводы.* В соответствии с полученными результатами исследования выявлено, что предлагаемый способ обеспечивает наилучшие результаты сегментации «речь/пауза» чистых и зашумленных речевых сигналов; использование отношения кратковременной энергии функции оператора Тигера к средней частоте в качестве информативного параметра обеспечивает максимальную релевантность к задаче сегментации; применение вспомогательного алгоритма исправления ошибочных статусов повышает эффективность сегментации.

Ключевые слова: обработка речевых сигналов, сегментации «речь/пауза», преобразование Фурье, энергетический оператор Тигера

Для цитирования: Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Дудников Д. С. Новый подход сегментации речевых сигналов на основе частотно-временного анализа // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 80–92. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-11

NOVEL APPROACH BASED ON TIME-FREQUENCY ANALYSIS FOR SEGMENTATION OF SPEECH SIGNALS

A.K. Alimuradov¹, A.Yu. Tychkov², P.P. Churakov³, D.S. Dudnikov⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹alansapfir@yandex.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³churakov.pp@gmail.com, ⁴dmitriy.s.gmpf@gmail.com

Abstract. *Background.* The accuracy of speech signal segmentation depends directly on the parameters used to determine the boundaries of the beginning and the end of informative fragments in a continuous speech stream. The purpose of the work is to increase the efficiency of speech/pause segmentation due to the frequency-time analysis of speech signals. The research object is the parameters that describe speech characteristics in the frequency and time domains. The research subject is the relevance of the informative parameters of speech signals to the task of speech/pause segmentation. *Materials and methods.* The methods of short-term analysis of spectral and energy characteristics of speech based on the discrete Fourier transform and the energy Teager operator were used in the work. Software implementation of the proposed method was performed in ©MATLAB mathematical modeling environment produced by MathWorks *Results.* A novel original approach to speech/pause segmentation based on the analysis of the values of the mean frequency (in the frequency domain) and short-term energy of the Teager operator function (in the time domain) is

proposed. The proposed approach is unique due to an auxiliary algorithm to correct speech/pause segmentation errors, developed on the basis of physiological functioning of the respiratory apparatus organs during the formation of a continuous speech stream. A brief overview of speech signal informative parameters used for speech/pause segmentation has been presented, and the proposed approach performance has been detailed. The suggested approach has been compared with the known methods of speech/pause segmentation for pure and noisy speech signals. *Conclusions.* The research findings have evidenced the best results of speech/pause segmentation for pure and noisy speech signals being achieved by the methods based on the proposed approach; the ratio of the short-term energy of the Teager operator function to the mean frequency as an informative parameter ensuring maximum relevance to the segmentation problem; an auxiliary algorithm to correct false states enhancing the efficiency of segmentation.

Keywords: speech signal processing, speech/pause segmentation, Fourier transform, Teager energy operator

For citation: Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Dudnikov D.S. Novel approach based on time-frequency analysis for segmentation of speech signals. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):80–92. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-11

Введение

Сегментация речевых сигналов является одной из основных задач предварительной обработки практически для всех приложений в области речевых технологий. В общем понимании сегментация представляет собой деление слитного потока речи на квазистационарные по определенным признакам и характеристикам фрагменты. Точность сегментации речевых сигналов напрямую влияет на эффективность функционирования речевого приложения [1]. В зависимости от предназначения речевого приложения (распознавание речи, голосовое управление, идентификация диктора по голосу, оценка состояния здоровья человека по речи и др.) сегментация осуществляется на разных уровнях. На рис. 1 представлены три уровня сегментации речевых сигналов [2]. Для одних приложений достаточно сегментации «речь/пауза», для других может потребоваться сегментация на вокализованные и невокализованные фрагменты с последующим выделением периодов колебаний голосовых связок в тональных звуках.

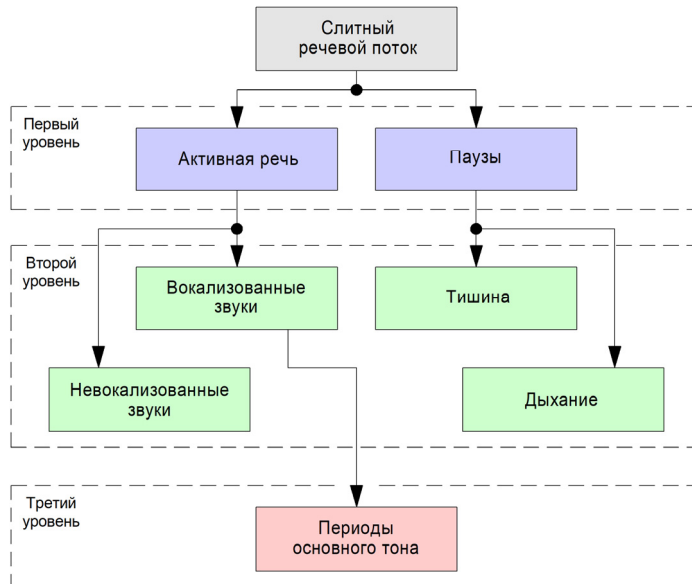


Рис. 1. Уровни сегментации речевых сигналов

Речевой сигнал имеет сложную структуру, амплитудные и частотные характеристики которого быстро изменяются во времени. Также важную роль в структуре речи играют индивидуальные физиологические особенности органов речевого аппарата и эмоциональное состояние человека. По этой причине задачи выбора и обоснования набора информативных параметров для сегментации речевых сигналов являются нетривиальными и представляют большую сложность и важность. Отсюда следует многообразие подходов к решению задач сегментации разного уровня, которые можно разделить на временные, частотные и частотно-временные способы.

Аналитический авторский обзор зарубежной и отечественной литературы выявил следующие широко применяемые способы сегментации [3]:

- во временной области посредством анализа значений одномерного расстояния Махаланобиса (One Dimensional Mahalanobis Distance, ODM) [4], кратковременной энергии (Short Time Energy, STE) [5] и количества пересечения функции сигнала через нулевую ось (Zero-Crossing Rate, ZCR) [6];

- в частотной области посредством анализа значений мел-частотных кепстральных коэффициентов (Mel-Frequency Cepstral Coefficients, MFCC) [7] и линейно-частотных кепстральных коэффициентов (Linear-Frequency Cepstral Coefficients, LFCC) [8];

- в частотно-временной области посредством комбинирования частотных и временных способов.

Преимуществом способов сегментации во временной области являются быстрдействие и малые требования к вычислительным ресурсам. Недостатком является низкая устойчивость к шумам и помехам. И наоборот, преимуществом способов сегментации в частотной области является помехоустойчивость, а недостатком – большие вычислительные затраты.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод об актуальности создания новых и совершенствования существующих подходов к решению задачи сегментации речевых сигналов на разных уровнях.

В данной статье представлен новый подход сегментации «речь/пауза» на основе частотно-временного анализа фрагментов речевых сигналов. Оригинальность подхода заключается в использовании в качестве информативных параметров для сегментации «речь/пауза» значений средней частоты [9] (в частотной области) и кратковременной энергии функции оператора Тигера (Teager Energy Operator, TEO) [10] (во временной области). Также уникальностью предлагаемого подхода является авторский вспомогательный алгоритм исправления ошибок сегментации «речь/пауза», разработанный на основе физиологических особенностей функционирования органов речевого аппарата при формировании слитного потока речи.

Данная научная статья подготовлена в рамках проекта № МД-1066.2022.4 «Исследование скрытых паттернов речевых сигналов и разработка способов обнаружения и классификации естественно выраженных психоэмоциональных состояний человека», финансируемого Советом по грантам Президента РФ. Статья является продолжением ранее опубликованных научных работ, посвященных разработке оригинальных способов обработки речевых сигналов для задачи обнаружения и классификации психоэмоциональных состояний человека по речи [11, 12].

Научная статья включает в себя шесть разделов. Второй раздел посвящен описанию информативных параметров речевых сигналов – средней частоты и кратковременной энергии функции оператора Тигера. В третьем разделе представлено описание предлагаемого подхода сегментации «речь/пауза». Четвертый и пятый разделы посвящены исследованию и анализу результатов исследования предлагаемого подхода. Шестой раздел статьи посвящен выводам и перспективам дальнейшей научной работы.

Материалы и методы

Средняя частота

Для сегментации речевых сигналов во временной области часто используется значение количества пересечения функции сигнала через нулевую ось. Частота пересечений может служить простейшей характеристикой спектральных свойств речевого сигнала, хотя обработка осуществляется во временной области [6]. Данный подход в полной мере справедлив для узкополосных сигналов. Речевой сигнал является широкополосным и функция среднего количества пересечений через нулевую ось может быть грубой для оценки спектральных свойств, особенно на фоне посторонних шумов. По этой причине целесообразно использовать значение средней частоты [9], которое в полной мере позволяет оценить спектральные свойства речи. В этом случае обработка речевых сигналов осуществляется в частотной области и вопрос повышения устойчивости к посторонним шумам решается.

Вычисление средней частоты осуществляется по следующей формуле:

$$F_{mean} = \frac{\sum_{k=1}^{F_s/2} x(k) \cdot PSD(k)}{\sum_{k=1}^{F_s/2} PSD(k)}, \quad (1)$$

где F_{mean} – средняя частота речевого сигнала со спектром мощности $PSD(k)$; $x(k)$ – исследуемый речевой сигнал в частотной области; k – дискретный отсчет сигнала в частотной области; F_s – частота дискретизации речевого сигнала.

Спектр мощности вычисляется с помощью быстрого преобразования Фурье с размерностью $K = 2048$ дискретных отсчетов. В отличие от количества пересечения функции сигнала через нулевую ось при вычислении средней частоты обязательно учитывается информация о распределении энергии каждого спектрального компонента (k) речевого сигнала (спектральное распределение энергии). Таким образом, значение средней частоты информативнее, так как включает в себя данные о спектральных и энергетических характеристиках речи.

Кратковременная энергия

Для сегментации речевых сигналов разного уровня используется значение кратковременной энергии, которое представляет собой сумму квадратов амплитуд дискретных отсчетов сигнала во временной области:

$$STE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n)]^2, \quad (2)$$

где $x(n)$ – исследуемый сигнал во временной области; n – дискретный отсчет сигнала во временной области; N – количество дискретных отсчетов в исследуемом речевом сигнале.

Сегментация «речь/пауза» на основе анализа значений кратковременной энергии построена на предположении, что энергия вокализованных и невокализованных звуков больше, чем энергия участков тишины и дыхания.

Энергетический оператор Тигера

Математический аппарат энергетического оператора Тигера был предложен Х. М. Тигером (H.M. Teager) в рамках научного исследования, посвященного моделированию нелинейного процесса воспроизведения речи. Оператор Тигера – это дифференциальный энергетический оператор второго порядка, позволяющий вычислять энергетические характеристики сигнала [10]. Для дискретных сигналов функция оператора Тигера вычисляется по следующей формуле:

$$TEO(n) = x(n)^2 - x(n-1) \cdot x(n+1). \quad (3)$$

Оператор Тигера обеспечивает отличное временное разрешение, поскольку для вычисления энергии в каждый момент времени требуется всего три дискретных значения. Математический аппарат оператора обладает эффективностью, простотой и хорошей восприимчивостью к мгновенному изменению амплитуды и частоты сигнала. В области обработки речевых сигналов энергетический оператор Тигера также успешно используется для повышения эффективности сегментации разного уровня [13, 14].

Описание нового подхода

На рис. 2 представлена последовательность этапов обработки речевых сигналов предлагаемого подхода сегментации «речь/пауза» на основе частотно-временного анализа. Суть предлагаемого подхода заключается в сегментации речевых сигналов на фрагменты (длительностью 10 мс) (этап 2), вычислении информативных параметров (средней частоты и кратковременной энергии функции оператора Тигера) (этап 3), определении пороговых значений (этап 4) и статусов «речь/пауза» фрагментов (этап 5) с последующим исправлением ошибочных статусов (этап 6) и определением результатов итоговой сегментации (этап 7).

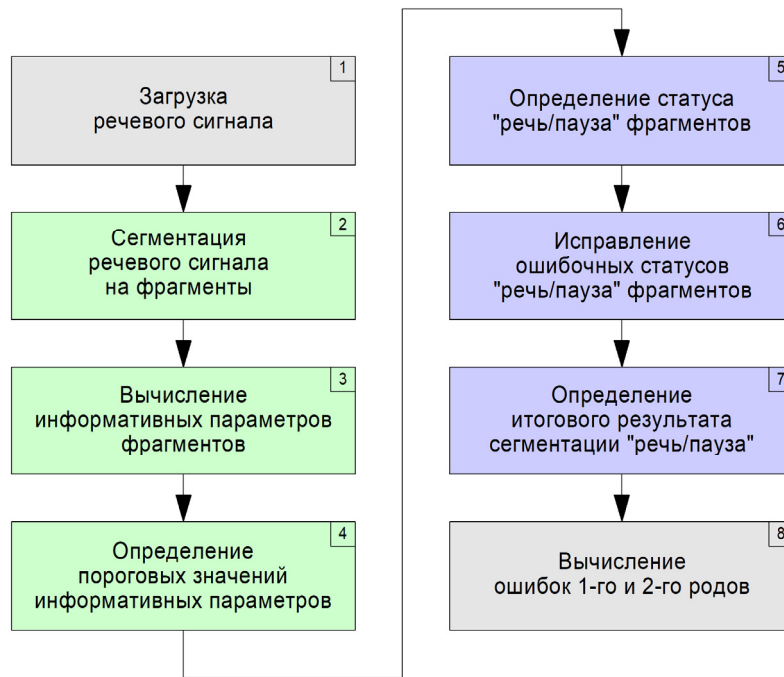


Рис. 2. Последовательность этапов обработки речевых сигналов предлагаемого подхода сегментации «речь/пауза»

Рассмотрим подробнее некоторые этапы обработки предлагаемого подхода. На рис. 3 представлена иллюстрация, поясняющая процесс определения пороговых значений информативных параметров (P) – средней частоты (F_{mean}) и кратковременной энергии функции оператора Тигера (STETEO).

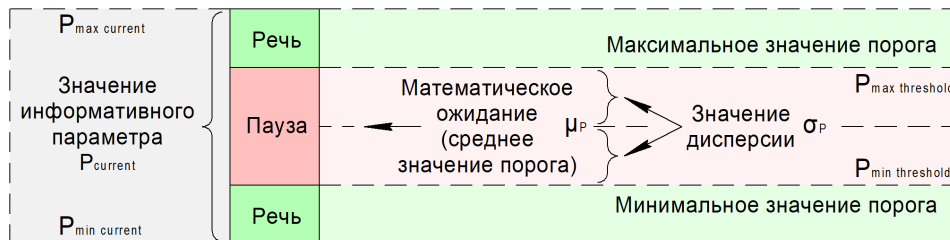


Рис. 3. Определение пороговых значений информативных параметров

Для определения диапазона значений информативного параметра, соответствующего статусу «пауза» (между минимальным ($P_{min\ threshold}$) и максимальным ($P_{max\ threshold}$) уровнями порога) используется участок вынужденной начальной паузы, которую человек выдерживает перед произношением (воспроизведением речи). Это связано с физиологией речевого аппарата человека. Обычно вынужденная пауза имеет длительность не более 200 мс и соответствует тишине с фоновым шумом.

Для определения $P_{min\ threshold}$ и $P_{max\ threshold}$ вычисляется математическое ожидание (μ_P) и дисперсия (σ_P) значений информативного параметра первых 20 фрагментов вынужденной начальной паузы (при длительности анализируемых фрагментов 10 мс):

$$\mu_P = \frac{1}{20} \sum_{s=1}^{20} P_{current_s}, \quad (4)$$

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{s=1}^{20} (P_{current_s} - \mu_P)^2}, \quad (5)$$

где $P_{current_s}$ – текущее значение информативного параметра фрагментов речевого сигнала; s – номер фрагмента.

Определение статуса «речь/пауза» фрагментов речевого сигнала заключается в проверке следующих условий:

$$|P_{current_s} - \mu_P| \geq U \times \sigma_P, \tag{6}$$

где U – значение коэффициента порога.

Коэффициент порога U введен для расширений динамического диапазона значений информативного параметра между $P_{min\ threshold}$ и $P_{max\ threshold}$. Коэффициент принимает значения от 1 до 15 для грубой настройки порога и от 0,1 до 1,0 для мягкой настройки.

Если разница по модулю между текущим значением $P_{current}$ и средним значением порога μ_P информативного параметра больше или равна значению дисперсии σ_P , то фрагмент соответствует речи. И наоборот, если условие не выполняется, то фрагмент соответствует паузе.

На рис. 4 представлена иллюстрация, поясняющая принцип работы вспомогательного алгоритма исправления ошибочных статусов «речь/пауза». Вспомогательный алгоритм исправления ошибок сегментации основан на физиологических особенностях функционирования органов речевого аппарата при формировании слитного потока речи. Поток слитной речи представляет собой нестационарный случайный процесс, быстро изменяющийся во времени. Однако из-за инерции органов речевого аппарата характеристики слитной речи не могут изменяться мгновенно. Данная физиологическая особенность обеспечивает кратковременную стационарность речи длительностью не более 40 мс, т.е. вне зависимости от скорости изменения амплитудных и частотных характеристик состояние речи на участках длительностью 40 мс (4 фрагмента по 10 мс) будет неизменным. В левой части рис. 4 представлены варианты статусов «речь/пауза» фрагментов до исправления, в правой части – после исправления. Как видно из рисунка, вспомогательный алгоритм обеспечивает исправление ошибок сегментации «речь/пауза» на участках длительностью 40 мс, учитывая кратковременную стационарность речи.

Статус "речь/пауза" фрагментов до исправления	Статус "речь/пауза" фрагментов после исправления
Речь Пауза Пауза Пауза Пауза	Речь Пауза Пауза Пауза Пауза
Речь Пауза Пауза Пауза Речь	Речь Речь Речь Речь -
Речь Пауза Пауза Речь -	Речь Речь Речь - -
Речь Пауза Речь - -	Речь Речь - - -
Речь Речь - - -	Речь Речь - - -

- фрагмент со статусом "речь"
 - фрагмент со статусом "пауза"
 - фрагмент с несправленным статусом

Рис. 4. Принцип работы вспомогательного алгоритма исправления ошибочных статусов «речь/пауза»

Исследование нового подхода

Исследование предлагаемого подхода заключалось в оценке эффективности сегментации «речь/пауза» чистых речевых сигналов в зависимости от значений коэффициента порога и зашумленных белым шумом речевых сигналов с разными отношениями сигнал/шум (ОСШ).

Для исследования предлагаемого подхода сформирована речевая база данных. Речевые сигналы длительностью не более 10 с были зарегистрированы посредством специализированных методики и технических средств. Подготовленные дикторы в количестве 20 человек воспроизвели речь на русском языке, содержащую публицистический текст (30 записей), текст из литературного произведения (30 записей) и счет чисел от 0 до 100 (10 записей). Общее количество зарегистрированных речевых сигналов – 1400.

Зашумление чистых речевых сигналов осуществлялось программно посредством наложения сгенерированного белого шума в программе аудиоредактирования «Audacity». База зашумленных речевых сигналов сформирована с различными значениями ОСШ от –5 до 15 дБ с шагом 5 дБ.

Эффективность сегментации оценивалась в соответствии с полученными значениями ошибок 1-го (α) и 2-го (β) рода. Основной задачей сегментации «речь/пауза» считалось определение фрагментов речи среди всех фрагментов речевого сигнала. Ошибкой α считалась ситуация, когда фрагменту речи присваивался статус «пауза». Ошибкой β считалась ситуация, когда фрагменту паузы присваивался статус «речь». Ошибки определялись по результатам сопоставления полученных данных сегментации с данными сегментации, осуществленной вручную.

Сегментация «речь/пауза» осуществлялась посредством предлагаемого подхода на основе анализа:

- средней частоты и применения вспомогательного алгоритма исправления ошибочных статусов «речь/пауза» ($F_{\text{mean}+\text{correction}}$);
- отношения кратковременной энергии функции оператора Тигера к средней частоте ($STETEO/F_{\text{mean}}$);
- отношения кратковременной энергии функции оператора Тигера к средней частоте и применения вспомогательного алгоритма исправления ошибочных статусов «речь/пауза» ($STETEO/F_{\text{mean}+\text{correction}}$).

Результаты оценивались в сравнении с известными способами сегментации «речь/пауза» на основе анализа:

- количества пересечений функции сигнала через нулевую ось (ZCR);
- кратковременной энергии (STE);
- одномерного расстояния Махаланобиса (ODMD);
- количества пересечений сигнала через нулевую ось функции оператора Тигера (ZCRTEO);
- кратковременной энергии функции оператора Тигера (STETEO);
- количества пересечений сигнала через нулевую ось и кратковременной энергии (ZCR+STE);
- количества пересечений сигнала через нулевую ось и кратковременной энергии функции оператора Тигера (ZCRTEO + STETEO).

В табл. 1–4 представлены результаты проведенного исследования – усредненные значения ошибок α и β в зависимости от значений коэффициента порога, полученные по результатам сегментации чистых и зашумленных речевых сигналов способами ZCR, STE, ODMD, ZCRTEO, STETEO, ZCR + STE, ZCRTEO + STETEO, $F_{\text{mean}+\text{correction}}$, $STETEO/F_{\text{mean}}$ и $STETEO/F_{\text{mean} + \text{correction}}$.

Анализ результатов исследования

В соответствии с данными в табл. 1 и 2 наилучший результат сегментации «речь/пауза» с ошибками $\alpha = 2,08\%$ и $\beta = 2,12\%$ при $U = 4$ достигается способом $STETEO/F_{\text{mean} + \text{correction}}$ на основе предлагаемого подхода. Максимально близкими по эффективности являются способы STETEO и ZCRTEO + STETEO с ошибками $\alpha = 2,08\%$ и $\beta = 3,88\%$ при $U = 14$. Однако здесь важно отметить, что наилучший результат сегментации во всем диапазоне зна-

чений коэффициента порога от 1 до 15 обеспечивается только способом STETEO/Fmean + correction. Объясняется это максимальной релевантностью информативного параметра (отношение кратковременной энергии функции оператора Тигера к средней частоте) к задаче сегментации и эффективностью применения вспомогательного алгоритма исправления ошибочных статусов «речь/пауза».

Таблица 1

Усредненные значения ошибок α и β , полученные по результатам сегментации чистых речевых сигналов способами ZCR, STE, ODMD, ZCRTEO и STETEO

U	ZCR		STE		ODMD		ZCRTEO		STETEO	
	α , %	β , %	α , %	β , %	α , %	β , %	α , %	β , %	α , %	β , %
1	7,16	35,98	5,31	21,52	21,71	1,59	7,85	29,45	0,23	34,57
2	24,48	14,46	7,39	10,05	21,71	1,59	17,09	9,70	0,46	21,52
3	36,95	8,29	9,47	5,82	21,71	1,59	29,10	3,53	0,69	16,58
4	56,12	4,23	10,86	3,35	21,71	1,59	43,88	2,12	0,69	13,40
5	73,67	2,65	11,32	2,47	21,71	1,59	59,58	1,94	0,69	10,94
6	81,06	1,94	12,47	1,94	21,71	1,59	79,45	1,59	0,92	8,99
7	86,37	1,94	13,63	1,94	21,71	1,59	98,15	1,59	0,92	7,41
8	87,53	1,76	15,24	1,59	21,71	1,59	100,00	1,59	1,15	6,00
9	87,99	1,59	16,40	1,59	21,71	1,59	100,00	1,59	1,15	5,47
10	88,45	1,59	17,09	1,59	21,71	1,59	100,00	1,59	1,39	4,59
11	89,38	1,59	18,01	1,59	21,71	1,59	100,00	1,59	1,62	4,41
12	89,84	1,59	18,48	1,59	21,71	1,59	100,00	1,59	2,08	4,23
13	89,84	1,59	19,17	1,59	21,71	1,59	100,00	1,59	2,08	4,23
14	90,30	1,59	19,86	1,59	21,71	1,59	100,00	1,59	2,08	3,88
15	90,30	1,59	20,09	1,59	21,71	1,59	100,00	1,59	2,08	3,88

Таблица 2

Усредненные значения ошибок α и β , полученные по результатам сегментации способами ZCR+STE, ZCRTEO+STETEO, Fmean+correction, STETEO/Fmean и STETEO/Fmean+correction

U	ZCR+STE		ZCRTEO+STETEO		Предлагаемый подход					
					Fmean + correction		STETEO/Fmean		STETEO/Fmean + correction	
	α , %	β , %	α , %	β , %	α , %	β , %	α , %	β , %	α , %	β , %
1	0,69	51,50	0,23	50,62	4,62	17,99	0,92	23,46	0,46	8,82
2	1,62	22,75	0,46	27,34	11,32	8,29	1,62	16,05	1,39	4,59
3	4,16	12,52	0,46	18,34	19,40	2,65	2,31	11,46	1,62	4,06
4	6,00	6,00	0,46	13,93	31,41	2,29	2,77	8,29	2,08	2,12
5	6,93	3,53	0,69	11,29	40,65	1,59	3,46	6,35	2,31	2,12
6	8,08	2,29	0,92	8,99	46,65	1,59	3,93	5,29	2,31	2,12
7	10,39	2,29	0,92	7,41	55,43	1,59	4,62	4,94	2,31	2,12
8	12,24	1,76	1,15	6,00	70,90	1,59	5,31	4,06	3,70	2,12
9	13,63	1,59	1,15	5,47	79,22	1,59	5,54	3,70	4,16	2,12
10	14,55	1,59	1,39	4,59	87,53	1,59	6,24	3,17	4,39	1,59
11	16,40	1,59	1,62	4,41	87,53	1,59	6,47	3,00	4,39	1,59
12	17,32	1,59	2,08	4,23	89,61	1,59	6,93	2,82	5,08	1,59
13	18,01	1,59	2,08	4,23	89,61	1,59	7,39	2,47	6,93	1,59
14	18,71	1,59	2,08	3,88	89,61	1,59	8,08	2,47	6,93	1,59
15	18,94	1,59	2,08	3,88	89,61	1,59	8,31	2,29	7,16	1,59

При сравнении результатов сегментации способов Fmean+correction ($\alpha = 11,32$ % и $\beta = 8,29$ % при $U = 3$), STETEO/Fmean ($\alpha = 4,62$ % и $\beta = 4,94$ % при $U = 7$) и STETEO/Fmean + correction ($\alpha = 2,08$ % и $\beta = 2,12$ % при $U = 4$) на основе предлагаемого подхода необходимо отметить повышение эффективности при совместном анализе значений средней частоты и

кратковременной энергии функции оператора Тигера с применением вспомогательного алгоритма исправления ошибочных статусов «речь/пауза».

В соответствии с данными в табл. 3 и 4 наилучшие результаты сегментации «речь/пауза» зашумленных речевых сигналов также обеспечиваются способами на основе предлагаемого подхода:

- ОСШ –5 дБ, STETEO/Fmean + correction, $\alpha = 10,86\%$ и $\beta = 10,58\%$ при $U = 2$;
- ОСШ 0 дБ, STETEO/Fmean + correction, $\alpha = 9,70\%$ и $\beta = 3,17\%$ при $U = 2$;
- ОСШ 5 дБ, Fmean + correction, $\alpha = 8,78\%$ и $\beta = 3,35\%$ при $U = 1$;
- ОСШ 10 дБ, STETEO/Fmean + correction, $\alpha = 8,55\%$ и $\beta = 1,59\%$ при $U = 3$;
- ОСШ 15 дБ, STETEO/Fmean + correction, $\alpha = 4,16\%$ и $\beta = 5,82\%$ при $U = 2$.

Таблица 3

Усредненные значения α и β , полученные по результатам сегментации чистых и зашумленных речевых сигналов способами ZCR, STE, ODMD, ZCRTEO и STETEO

ОСШ, дБ	ZCR			STE			ODMD			ZCRTEO			STETEO		
	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U
–5	37,64	30,16	1	39,03	2,65	3	100,00	1,59	1	50,12	42,33	1	26,56	15,52	1
0	25,17	25,57	2	21,71	9,88	3	100,00	1,59	1	46,42	35,63	1	20,32	11,64	1
5	20,32	4,94	2	13,86	2,12	3	60,28	1,59	1	36,03	31,39	1	11,78	3,35	2
10	18,94	4,06	2	9,70	3,88	3	42,03	1,59	1	31,87	44,62	1	12,93	2,82	2
15	13,16	8,82	2	10,16	4,59	3	35,57	1,59	1	36,49	32,98	1	9,70	3,53	2
Чистый сигнал	24,48	14,46	2	9,47	5,82	3	21,71	1,59	1	17,09	9,70	2	2,08	3,88	14

Таблица 4

Усредненные значения ошибок α и β , полученные по результатам сегментации чистых и зашумленных речевых сигналов способами ZCR + STE, ZCRTEO + STETEO, Fmean + correction, STETEO/Fmean и STETEO/Fmean+correction

ОСШ, дБ	ZCR + STE			ZCRTEO + STETEO			Предлагаемый подход								
							Fmean + + correction			STETEO/Fmean			STETEO/Fmean + + correction		
	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U	$\alpha, \%$	$\beta, \%$	U
–5	29,79	15,17	2	22,63	25,75	2	23,56	12,52	1	27,71	9,35	2	10,86	10,58	2
0	24,25	5,47	4	18,48	14,99	2	26,33	3,35	1	21,48	6,53	2	9,70	3,17	2
5	13,86	2,47	3	12,93	3,00	3	8,78	3,35	1	11,78	5,11	3	10,39	1,76	3
10	9,70	3,88	3	11,78	4,06	3	6,93	14,64	1	10,86	4,41	2	8,55	1,59	3
15	9,93	4,59	3	9,70	3,53	3	6,47	14,64	1	6,70	9,70	2	4,16	5,82	2
Чистый сигнал	6,93	3,53	5	2,08	3,88	14	11,32	8,29	2	4,62	4,94	7	2,08	2,12	4

Помехоустойчивость способов сегментации «речь/пауза» на основе предлагаемого подхода достигается за счет анализа информативных параметров речевых сигналов в частотно-временной области. Особенно важно отметить хорошие результаты сегментации при низких значениях ОСШ –5 и 0 дБ. Максимально близкие по помехоустойчивости способы обеспечивают результаты сегментации «речь/пауза» в 1,5–2 раза хуже, чем способы на основе предлагаемого подхода.

На рис. 5 представлен пример наилучшей сегментации «речь/пауза» одного зашумленного речевого сигнала из сформированной речевой базы данных. Светло-серым цветом отмечен зашумленный речевой сигнал, темно-серым – исходный чистый сигнал. Линией синего цвета отмечен результат сегментации, выполненной вручную. Линией красного цвета отмечен результат сегментации, выполненной способом STETEO/Fmean + correction на основе анализа отношения кратковременной энергии функции оператора Тигера к средней частоте и применения вспомогательного алгоритма исправления ошибочных статусов повышает эффективность сегментации «речь/пауза».

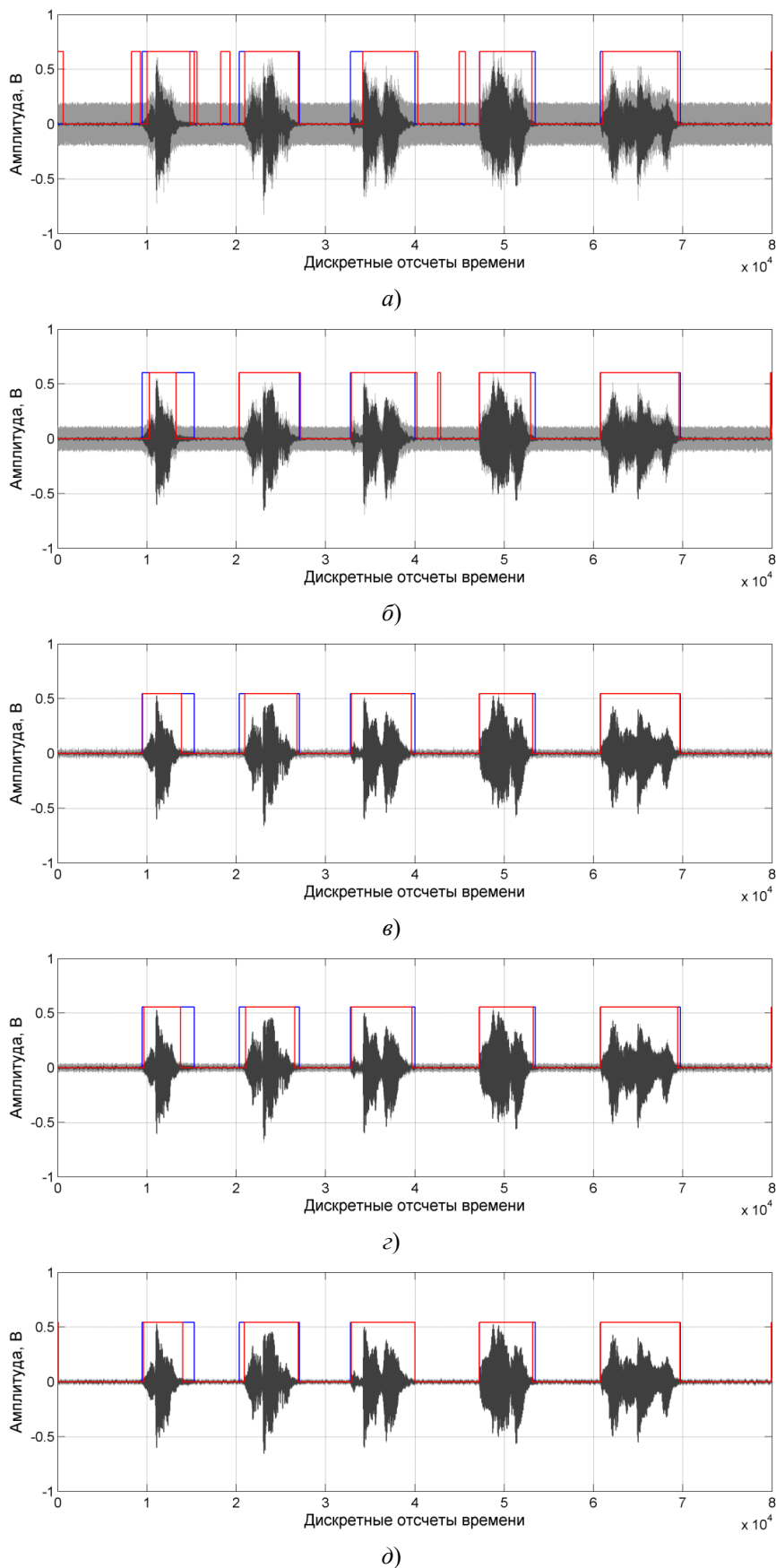


Рис. 5. Пример сегментации «речь/пауза» зашумленного речевого сигнала способом STETEO/Fmean+correction на основе предложенного подхода:
 а – ОСШ = -5 дБ; б – ОСШ = 0 дБ; в – ОСШ = 5 дБ; г – ОСШ = 10 дБ; д – ОСШ = 15 дБ

Заключение

В соответствии с анализом результатов исследования сделаны следующие краткие выводы:

1. Предлагаемый подход на основе частотно-временного анализа фрагментов речевых сигналов обеспечивает наилучший результат в сравнении с известными способами сегментации «речь/пауза».
2. Использование отношения кратковременной энергии функции оператора Тигера к средней частоте в качестве информативного параметра обеспечивает максимальную релевантность к задаче сегментации «речь/пауза».
3. Применение вспомогательного алгоритма исправления ошибочных статусов повышает эффективность сегментации «речь/пауза».
4. Наилучшие результаты сегментации «речь/пауза» во всем диапазоне значений коэффициента порога обеспечиваются только способами на основе предлагаемого подхода.
5. Способы на основе предлагаемого подхода обладают наилучшей помехоустойчивостью в сравнении с известными способами сегментации «речь/пауза».

В перспективе коллективом авторов планируется провести дополнительные исследования быстродействия способов сегментации «речь/пауза» на основе предлагаемого подхода, а также исследовать устойчивость предлагаемого подхода к коричневому и розовому шумам.

Список литературы

1. Schuller B. W., Batliner A. M. *Computational Paralinguistics: Emotion, Affect and Personality in Speech and Language Processing*. New York : Wiley, 2013. P. 344.
2. Huang X., Acero A., Hon H.-W. *Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Development*. New Jersey : Prentice Hall, 2001. 980 p.
3. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П. [и др.]. Способ повышения эффективности сегментации речь/пауза на основе метода декомпозиции на эмпирические моды // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 24–43.
4. Duda R. O., Hart P. E., Strok D. G. *Pattern Classification*. 2nd ed. New Jersey : A Wiley-Interscience Publ. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 688 p.
5. Childers D. G., Hand M., Larar J. M. Silent and voiced/unvoiced/ mixed excitation (four-way), classification of speech // *IEEE Transaction on ASSP*. 1989. Vol. 37, № 11. P. 1771–1774.
6. Atal B., Rabiner L. R. A pattern recognition approach to voiced unvoiced-silence classification with applications to speech recognition // *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process*. 1976. Vol. 24, № 3. P. 201–212.
7. Martin A., Charlet D., Mauuary L. Robust speech/non-speech detection using LDA applied to MFCC // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221) (ICASSP2001) (May 7–11, 2001)*. Salt Lake City, UT, USA, 2001. Vol. 1. P. 237–240.
8. Hlavnička J., Smejla R., Tykalová T. et al. Automated analysis of connected speech reveals early biomarkers of Parkinson's disease in patients with rapid eye movement sleep behaviour disorder // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. 13 p.
9. Sharma R., Prasanna S. R. M. Characterizing glottal activity from speech using empirical mode decomposition // *21st National Conference on Communications (NCC) (27 February – 1 March, 2015)*. Mumbai, India, 2015. P. 1–6.
10. Kaiser J. F. On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal // *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (April 3–6, 1990)*. Albuquerque, NM, USA, 1990. Vol. 2. P. 381–384.
11. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П. [и др.]. Способ обработки речевых сигналов на основе метода декомпозиции на эмпирические моды // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2022. № 2 (40). С. 75–89.
12. Алимуратов А. К. Способ сегментации речь/пауза на основе энергетического оператора Тигера // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2021. № 4. С. 52–63.
13. Zhuikov V. Ya., Kharchenko A. N. Algorithm for speech signal segments classification // *Electronics and Communications. Special issue on Electronics and Nanotechnology*. 2009. Part 1, № 2-3. P. 130–137.
14. Bahoura M., Rouat J. Wavelet speech enhancement based on the teager energy operator // *IEEE Signal Processing Letter*. 2001. Vol. 8, № 1. P. 10–12.

References

1. Schuller B.W., Batliner A.M. *Computational Paralinguistics: Emotion, Affect and Personality in Speech and Language Processing*. New York: Wiley, 2013:344.

2. Huang X., Acero A., Hon H.-W. *Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Development*. New Jersey: Prentice Hall, 2001:980.
3. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P. et al. A way to increase the efficiency of speech/pause segmentation based on the method of decomposition into empirical modes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of Higher Educational Institutions. Volga region. Technical sciences*. 2021;(2):24–43. (In Russ.)
4. Duda R.O., Hart P.E., Strok D.G. *Pattern Classification. 2nd ed.* New Jersey: A Wiley-Interscience Publ. John Wiley & Sons, Inc., 2001:688.
5. Childers D.G., Hand M., Larar J.M. Silent and voiced/unvoiced/ mixed excitation (four-way), classification of speech. *IEEE Transaction on ASSP*. 1989;37(11):1771–1774.
6. Atal B., Rabiner L.R. A pattern recognition approach to voiced unvoiced-silence classification with applications to speech recognition. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1976;24(3):201–212.
7. Martin A., Charlet D., Mauuary L. Robust speech/non-speech detection using LDA applied to MFCC. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221) (ICASSP2001) (May 7–11, 2001)*. Salt Lake City, UT, USA, 2001;1:237–240.
8. Hlavnička J., Čmejla R., Tykalová T. et al. Automated analysis of connected speech reveals early biomarkers of Parkinson's disease in patients with rapid eye movement sleep behaviour disorder. *Scientific Reports*. 2017;7:13.
9. Sharma R., Prasanna S.R.M. Characterizing glottal activity from speech using empirical mode decomposition. *21st National Conference on Communications (NCC) (27 February – 1 March, 2015)*. Mumbai, India, 2015:1–6.
10. Kaiser J.F. On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal. *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (April 3–6, 1990)*. Albuquerque, NM, USA, 1990;2:381–384.
11. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P. et al. Method of processing speech signals based on the method of decomposition into empirical modes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2022;(2):75–89. (In Russ.)
12. Alimuradov A.K. Segmentation method speech/pause based on the energy operator Tigera. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(4):52–63. (In Russ.)
13. Zhuikov V.Ya., Kharchenko A.N. Algorithm for speech signal segments classification. *Electronics and Communications. Special issue on Electronics and Nanotechnology*. 2009;1(2-3):130–137.
14. Bahoura M., Rouat J. Wavelet speech enhancement based on the teager energy operator. *IEEE Signal Processing Letter*. 2001;8(1):10–12.

Информация об авторах / Information about the authors

Алан Казанферович Алимуратов

кандидат технических наук,
директор студенческого научно-
производственного бизнес-инкубатора,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alan K. Alimuradov

Candidate of technical sciences,
director of the student research
and production business incubator,
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

Alexander Yu. Tychkov

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

Петр Павлович Чураков

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

Petr P. Churakov

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

Дмитрий Сергеевич Дудников

студент,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dmitriy.s.gmpf@gmail.com

Dmitriy S. Dudnikov

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 14.04.2022

Поступила после рецензирования/Revised 16.05.2022

Принята к публикации/Accepted 20.06.2022

УДК 615.47:616–072.7
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-12

РЕКОНСТРУКЦИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СЕРДЦА С ПОМОЩЬЮ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

М. Н. Крамм¹, О. Н. Бодин², А. Ю. Бодин³, Г. В. Жихарева⁴, Чыонг Тхи Лан Нхи⁵

^{1,3,4,5} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

² Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹KrammMN@mail.ru, ²bodin_o@inbox.ru, ³Bodin98@mail.ru,

⁴ZhikharevaGV@mpei.ru, ⁵truongthilannhi@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается медицинская информационная система неинвазивной электрокардиодиагностики, которая основана на регистрации и обработке электрокардиосигналов многоэлектродных отведений. Для повышения достоверности диагностики заболеваний сердца при электрокардиологическом скрининге предлагается проводить в динамическом режиме визуализацию карт электрической активности сердца на поверхности эпикарда. *Материалы и методы.* Рассмотрена функциональная схема информационной многоэлектродной скрининговой системы электрокардиодиагностики. Проводится реконструкция распределения электрического потенциала на поверхности сердца в течение кардиоцикла. При обработке используются как записанные электрокардиосигналы, так и координаты электродов на поверхности торса человека. *Результаты.* Приведена оценка количества и расположения электродов на поверхности торса. Определена скорость передачи данных при регистрации многоканальных электрокардиосигналов. Рассмотрены особенности 2D визуализации карт электрической активности сердца. *Выводы.* Медицинская информационная система неинвазивной электрокардиодиагностики предоставляет возможность наблюдения карт электрической активности на поверхности сердца, изменяющихся синхронно с изменением электрокардиограммы. Использование жилета нескольких типоразмеров с предустановленными электродами позволяет сократить время установки электродов для использования системы в скрининговых обследованиях.

Ключевые слова: медицинская информационная система, электрокардиодиагностика, электроды, электрокардиосигналы, карта распределения потенциалов, реконструкция, 2D визуализация

Для цитирования: Крамм М. Н., Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Жихарева Г. В., Чыонг Тхи Лан Нхи. Реконструкция и визуализация электрической активности сердца с помощью многоэлектродной системы электрокардиодиагностики // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 93–101. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-12

RECONSTRUCTION AND VISUALIZATION OF THE HEART ELECTRICAL ACTIVITY USING A MULTIELECTRODE SYSTEM FOR ELECTROCARDIAGNOSTICS

M.N. Kramm¹, O.N. Bodin², A.Yu. Bodin³, G.V. Zhikhareva⁴, Truong Thi Lan Nhi⁵

^{1,3,4,5} National Research University «MPEI», Moscow, Russia

² Penza State Technological University, Penza, Russia

¹KrammMN@mail.ru, ²bodin_o@inbox.ru, ³Bodin98@mail.ru,

⁴ZhikharevaGV@mpei.ru, ⁵truongthilannhi@gmail.com

Abstract. *Background.* We consider the medical information system for non-invasive electrocardiodiagnostics, based on the registration and processing of electrocardiosignals from multielectrode leads. To improve the reliability of heart diseases diagnosing in electrocardiological screening, it is proposed to dynamically visualize maps of the heart electrical activity on the surface of the epicardium. *Materials and methods.* We propose the functional diagram of an information multielectrode screening system for electrocardiodiagnostics. The distribution of electrical potential on the heart surface during the cardiocycle is reconstructed. Within processing, both the recorded electrocardiosignals and the coordinates of the electrodes, placed on the human torso surface, are used. *Results.* We evaluated the number and location of electrodes on the torso surface. The data transfer rate was determined during the registration of multichannel electrocardiosignals. The features of 2D visualization for maps of the heart electrical activity are considered. *Conclusions.* The

medical information system for non-invasive electrocardiodiagnosics provides an opportunity to observe maps of electrical activity on the heart surface, changing synchronously with changes in the electrocardiogram. The usage of several sizes vests with pre-installed electrodes allows us to reduce the time of installation of electrodes for using the system in screening surveys.

Keywords: medical information system, electrocardiodiagnosics, electrodes, electrocardiosignals, potential distribution map, reconstruction, 2D visualization

For citation: Kramm M.N., Bodin O.N., Bodin A.Yu., Zhikhareva G.V., Truong Thi Lan Nhi. Reconstruction and visualization of the heart electrical activity using a multielectrode system for electrocardiagnosics. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):93–101. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-12

Введение

Основную проблему для современного здравоохранения представляют болезни системы кровообращения, которые, по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), прочно занимают первое место в мире по смертности населения. Так, по данным ВОЗ, в 2020 г. 17,9 миллионов людей умерли от болезней сердечно-сосудистой системы (ССЗ). Среди этих смертей 85 % связаны с сердечным инфарктом и инсультом [1]. Таким образом, важность усилий сообщества по борьбе с ССЗ невозможно переоценить. Основными путями снижения смертности от ССЗ являются профилактика и своевременная диагностика. При этом на первое место выступает профилактическое обследование (скрининг) населения. Актуальность электрокардиологического скрининга возрастает в условиях борьбы с эпидемией COVID-19 и ее последствиями в виде различных коморбидных осложнений. Поэтому важной социальной задачей является повышение достоверности и оперативности диагностики заболеваний сердца при электрокардиологическом скрининге [2, 3].

Одним из базовых методов проведения скрининговых электрокардиологических обследований является электрокардиография. Однако электрокардиограммы – графики изменения во времени электрокардиографических сигналов (ЭКС) в общепринятых отведениях – дают интегральную информацию об источниках электрической активности сердца (ЭАС), и поэтому они приближенно связаны с электрической активностью области миокарда, ближней к тому или иному электроду [4]. Методы чреспищеводного и эндокардиального ЭКГ-исследований сердца являются сложными и не ориентированы на использование в амбулаторных условиях [5]. Важное наглядное направление развития электрокардиографических систем связано с визуализацией пространственно-временной динамики ЭАС. Связанные с этим направлением методы анализа карт электрического потенциала на поверхности торса [6] имеют ограничения, связанные с эффектом ослабления мелких деталей в спектре пространственного распределения электрического потенциала при переходе от области миокарда к поверхности торса. В этой связи нас интересуют методы визуализации ЭАС на поверхности сердца, на основе регистрации и компьютерной обработки ЭКС, зарегистрированных многоэлектродной информационной системой электрокардиодиагностики.

Постановка задачи

Электрическая активность миокарда обусловлена функционированием специализированных клеток – кардиомиоцитов, порождающих электрическое поле и переносящих возбуждение за счет биохимических и биоэлектрических процессов. В связи с огромным (порядка 10^9) количеством кардиомиоцитов отследить их индивидуальное состояние не представляется технически возможным. Поэтому электрическое поле миокарда целесообразно представить как результат действия ансамбля элементарных дипольных электрических источников, пространственно распределенных в сердечной мышце и изменяющих свою активность в процессе перемещения волн возбуждения и реполяризации в сердце, как показано на рис. 1. Состояние данного ансамбля электрических источников характеризуется уровнем электрического потенциала на поверхности сердца, причем потенциал является функцией времени и пространственных координат на поверхности сердца [7]. Визуализация электрической активности сердца может быть наглядно представлена пространственными картами распределения потенциала на поверхности сердца (КППС), динамически изменяющимися во времени в течение кардиоцикла.

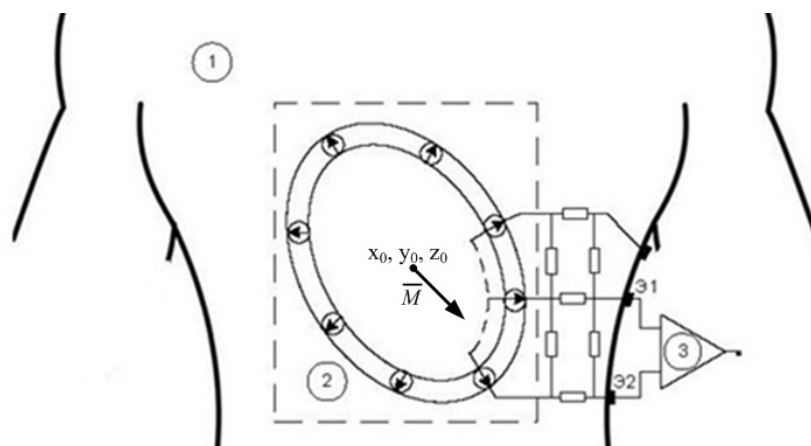


Рис. 1. Регистрация электрического поля, создаваемого ансамблем источников для отображения электрической активности сердца: 1 – торс; 2 – источники; 3 – устройство съема и регистрации разности потенциалов; Э1 и Э2 – отдельные электроды

Регистрация электрического поля миокарда неинвазивным путем осуществляется датчиками электрического потенциала – электродами, размещенными на поверхности торса человека. Поэтому целью нашей работы является переход от ЭКС, зарегистрированных многоэлектродной измерительной системой, к динамическим картам потенциала на поверхности сердца. В результате этого перехода должна быть проведена визуализация пространственных карт распределения потенциала, изменяющихся со временем в течение кардиоцикла. Такой подход отражен, в частности, в работах [8–10], однако описанные здесь системы требуют значительных аппаратных и временных затрат, в том числе с использованием томографов, и поэтому ориентированы на применение в клинических специализированных центрах. Наша работа направлена на использование жилетов стандартных размеров с предустановленными электродами и определение геометрии поверхности сердца на основании обработки электрокардиосигналов [11, 12]. Данный подход ориентирован на применение при скрининговых электрокардиологических обследованиях населения в амбулаторных условиях.

Материалы и методы

Основные этапы работы информационной многоэлектродной скрининговой системы электрокардиодиагностики представлены на рис. 2. Здесь в микропроцессорном блоке регистрации ЭКС, снимаемых с многоэлектродной системы, осуществляется усиление ЭКС, их оцифровка с помощью группы АЦП, формирование канальных групп отсчетов ЭКС для каждого такта дискретизации, передача этих групп в последовательном коде на USB вход персонального компьютера (ПК) с помощью высокоскоростного микроконтроллера. В результате регистрации ЭКС в ПК формируется двумерный массив s_{ij} , где i – номер момента времени (номер такта дискретизации), j – номер электрода. Цифровая предварительная обработка ЭКС включает коррекцию дрейфа изолинии, фильтрацию нижних частот и режекцию сетевой помехи [11]. На основе известных координат электродов создается мелкая сетка координат точек поверхности торса, также создается мелкая сетка координат точек поверхности сердца. Далее на основе потенциалов в точках расположения электродов для каждого отсчетного момента времени t_i проводится интерполяция потенциалов на мелкой сетке точек поверхности торса [13, 14]. Ключевой этап – этап реконструкции распределения потенциалов на мелкой сетке координат точек поверхности сердца для момента времени t_i , который реализуется в ходе итерационного алгоритма в рамках метода граничных элементов [15]:

$$\phi_k^h = (H^{hh})^{-1} (G^{hh} g_{k-1}^h - H^{bh} \phi^b); \quad g_k^h = (G^{hb})^{-1} (H^{hb} \phi_k^h + H^{bb} \phi^b),$$

где k – номер итерации; ϕ^b и ϕ^h – векторы потенциалов на поверхностях торса и сердца соответственно; g^h – вектор производной потенциала по направлению нормали к поверхности сердца; H^{hh} , G^{hh} , H^{bh} , G^{hb} , H^{hb} и H^{bb} – матрицы, которые определяются координатами то-

чек на поверхностях торса и сердца. На этапе визуализации электрической активности на экране монитора врача-кардиолога отображаются в динамическом режиме изменяющиеся со временем карты распределения потенциала на поверхности сердца в 2D или 3D форматах.

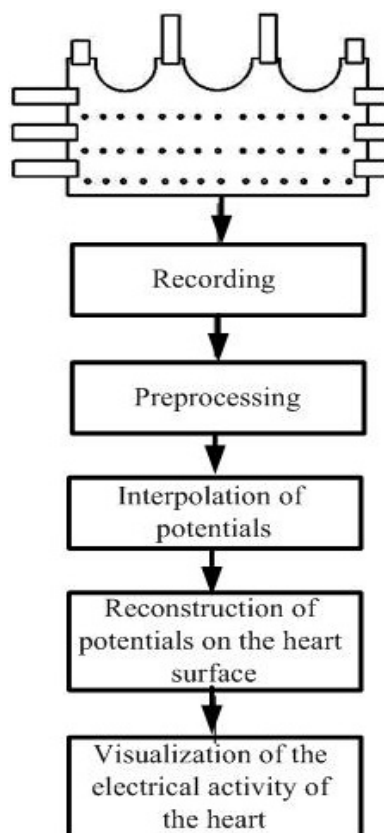


Рис. 2. Функциональная схема информационной многоэлектродной скрининговой системы электрокардиодиагностики

Существенным этапом при проведении регистрации ЭКС является установка электродов на поверхности торса. При достаточно большом количестве электродов (60–100) установка разовых электродов или электродов вакуумного типа в нужных местах поверхности торса занимает неоправданно большое время обследования. В этой ситуации решающее значение приобретает использование жилета нескольких типоразмеров с предустановленными электродами, показанного на рис. 3.



Рис. 3. Жилет с предустановленными электродами

При этом размер Small предлагается при длине периметра торса в поперечном сечении $l = 70 \div 90$ см, размер Medium – при $l = 90 \div 110$ см, размером Large – при $l = 110 \div 130$ см [12].

Использование эластичного материала жилета позволяет устанавливать электроды в нужных местах при вариациях размера торса в пределах типоразмера. При этом важно, что взаимное расположение электродов сохраняется. Система подтягивающих ремней обеспечивает нужный контакт электродов с кожей.

Результаты и обсуждение

Оценка количества и расположения электродов. Для оценки количества и расположения электродов на поверхности торса рассмотрим сферу радиуса $R_h = 5,5$ см, описанную вокруг сердца взрослого человека (в дальнейшем – сфера квазиэпикарда). Пусть l_{injury} – минимальный размер области повреждения на поверхности сердца, которое необходимо зарегистрировать (рис. 4).

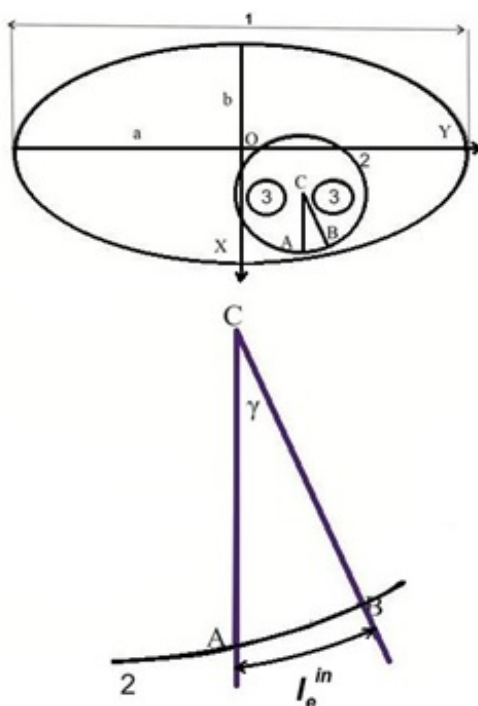


Рис. 4. Определение угла между направлениями на электроды:
1 – сечение торса; 2 – сечение сферы квазиэпикарда; 3 – правый и левый желудочки сердца

Тогда угол γ между радиусами сферы квазиэпикарда в плоскости поперечного сечения торса, соответствующий размеру l_{injury} , определяется соотношением:
$$\gamma = \frac{180^\circ \cdot l_{injury}}{\pi R_h}.$$

Поскольку угол между направлениями на электроды в плоскости поперечного сечения торса должен соответствовать углу γ , то количество электродов в этой плоскости $N_{trans} = \frac{360^\circ}{\gamma}.$

Поскольку пространственное разрешение по вертикали торса должно быть согласовано с разрешением в плоскости поперечного сечения, то расстояние между рядами электродов по вертикали $\Delta z = (b \cdot \operatorname{tg} \gamma) / 2$, где b – толщина торса. При этом количество рядов электродов по вертикали $N_z = \left[\frac{L_z}{\Delta z} + 1 \right]$, где L_z – размер области торса, охватывающей сердце в плоскости вертикального сечения торса, [] – обозначение целой части числа. Рассмотрим в качестве примера случай, когда площадь повреждения миокарда S_{injury} составляет 1 % от площади поверхности сердца. Тогда при площади поверхности сердца среднего мужчины, равной 385 см^2 [16], это составляет около $3,7 \text{ см}^2$. Данной площади соответствует размер повреждения

$l_{injury} = 2\sqrt{\frac{S_{injury}}{\pi}} = 2,2$ см. Тогда $\gamma = 22,5^\circ$, и $N_{trans} = 16$. При оценке размера охвата сердца в плоскости вертикального сечения торса $L_z = 18$ см [17] и при толщине торса $b = 15$ см получаем расстояние между рядами $\Delta z = 5,9$ см и количество рядов электродов $N_z = 4$. Таким образом, количество электродов $N_{el} = N_{trans} \cdot N_z = 64$. Регистрация ЭКС, снимаемых с этих электродов, может быть осуществлена с помощью 8 АЦП по 8 каналов в каждом АЦП.

Условия проведения регистрации ЭКС. Оценим скорость передачи данных при регистрации ЭКС. Общая частота оцифровки данных $f_{sample} = N_{chan} \cdot f_{sample/chan}$, где $N_{chan} = N_{el}$ – число каналов, равное числу активных электродов, $f_{sample/chan}$ – частота оцифровки на один канал. С частотой f_{sample} надо передавать в последовательном коде каналные группы байтов объемом $V = N_{chan} \cdot \rho + 2$, где ρ – количество байтов на одно отсчетное значение ЭКС, и в начале и конце каналной группы предусмотрены стартовые и стоповые байты. При этом скорость передачи данных $S = f_{sample/chan} \cdot (N_{chan} \cdot \rho + 2)$. В современных АЦП для цифровых электрокардиографов используют 24-разрядные сигма-дельта АЦП и $\rho = 3$ Bytes/sample. В результате, при частоте оцифровки на один канал $f_{sample} = 2$ кГц и $N_{chan} = 64$ получаем скорость передачи данных:

$$S = 388 \text{ kBytes/s} = 3,1 \text{ Mbps.}$$

Данный скоростной режим с удвоенным коэффициентом запаса поддерживается микропроцессорами типа STM32 и стандартом обмена данными между устройствами WI-FI. Максимальная ошибка из-за неодновременности передачи отсчетов в одной каналной группе при частоте оцифровки $f_{sample/chan} = 2$ кГц составляет 0,5 мс, что существенно меньше длительности характерных элементов электрокардосигнала.

Визуализация электрической активности сердца. Результат визуализации электрической активности сердца, проведенной при обработке реальных ЭКС по описанной выше методике, представлен на рис. 5. Здесь на рис. 5,а представлена 2D карта потенциала на плоской развертке поверхности квазиэпикарда для момента вершины R зубца.

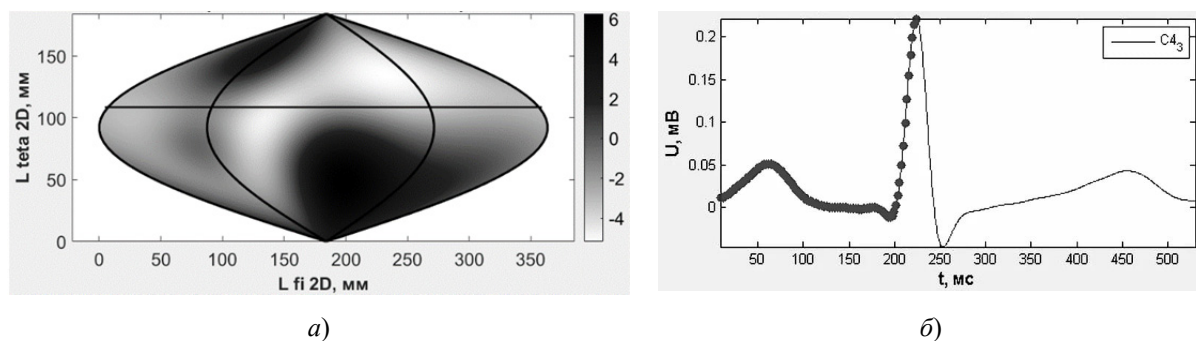


Рис. 5. Результат визуализации электрической активности сердца:

а – 2D карта потенциала на поверхности сердца в момент вершины R зубца;

б – ЭКС стандартного отведения с метками времени (последняя метка соответствует 2D карте слева)

При этом соответствие отделов сердца и областей плоской развертки показано на рис. 6, вертикальная ось симметрии проходит через центры левого предсердия и левого желудочка. Цветовая (как вариант – полутоновая) палитра с представленной шкалой цветов (яркостей) позволяет судить о величине потенциала. Карта строится на основе координатной сетки с равными длинами дуг элементов сетки в меридиональном и экваториальном направлениях. На рис. 5,б показан ЭКС в одном из стандартных отведений, причем временной маркер в виде жирной точки соответствует моменту времени 2D карты потенциала на рис. 5,а. Такая синхронизация 2D карт потенциала на поверхности сердца и известной кардиологу кардиограммы способствует наглядности при визуализации электрической активности сердца. Также достоинством 2D карты потенциала является возможность наблюдения временной динамики электрической активности во всех областях миокарда без дополнительной смены ракурса.

Из представленной карты вытекает возможность наблюдения неоднородностей в распределении потенциала на поверхности сердца порядка 20 мм, что соответствует приведенным выше оценкам размера области повреждения I_{injury} .

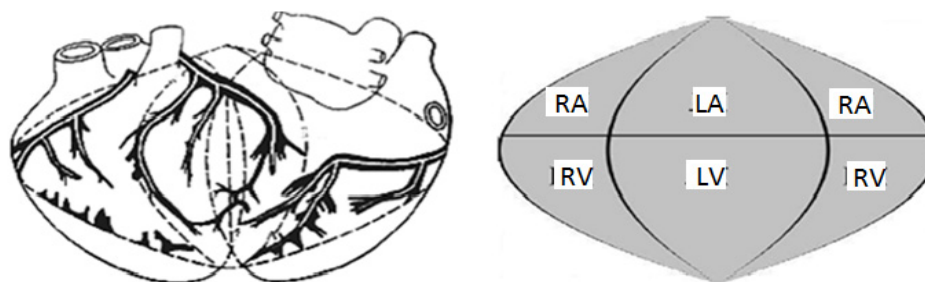


Рис. 6. Соответствие отделов сердца и областей на плоской развертке поверхности сердца: RA and LA – правое и левое предсердия; RV and LV – правый и левый желудочки

Выводы и заключение

Предложенный подход к реализации информационной системы электрокардиодиагностики позволяет в рамках скрининговых обследований предлагать врачу-кардиологу режим визуализации электрической активности сердца в виде динамически изменяющихся во времени карт распределения потенциала на поверхности сердца синхронно с изменением электрокардиограммы. Использование жилета нескольких типоразмеров с предустановленными электродами сокращает время установки электродов.

Список литературы

1. Statistics of cardiovascular diseases. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))
2. Přeučil T., Novotný M. Low-Cost Portable ECG // 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) : proceedings – research monograph (June 10th–14th, 2019). Budva, Montenegro, 2019. P. 660–663.
3. Petrunina E., Istomina T., Istomin V. et al. Intelligent Information and Measurement System of Monitoring Results and BFB-Trainings // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 : proceedings. 2020.
4. Macfarlane P. W., van Oosterom A., Pahlm O. et al. Comprehensive Electrocardiology. 2nd ed. London : Springer, 2011. Chapter 1–3. 2291 p.
5. Рахматуллин Ф. К. Чреспищеводная электростимуляция сердца и клиническая электрофизиология антиаритмических средств. Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. 111 с.
6. Полякова И. П. Поверхностное ЭКГ-картирование как метод диагностики нарушений ритма сердца // Неинвазивная диагностика в клинической аритмологии : монография. М. : Медицина, 2009. Гл. 6. С. 157–175.
7. Крамм М. Н. Биоэлектрические особенности перехода к эквивалентному электрическому генератору сердца для задач неинвазивной электрокардиодиагностики // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 64–72.
8. Potyagaylo D., Cortes E. G., Schulze W. H. W., Dössel O. Binary optimization for source localization in the inverse problem of ECG // Medical & Biological Engineering & Computing. 2014. Vol. 52. P. 717–728.
9. Bockeria L., Revishvili F., Kalinin F. et al. Hardware and software complex for non-invasive electrophysiological examination of the heart based on solving the inverse problem of electrocardiography // Med. techn. 2009. № 6. P. 1–7.
10. Onak O. N., Dogrusoz Y. S., Weber G. W. Effects of a priori parameter selection in minimum relative entropy method on inverse electrocardiography problem // Inverse Problems in Science and Engineering. 2018. Vol. 26, № 6. P. 877–897.
11. Патент РФ 2651068. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / О. Н. Бодин, А. Ю. Бодин, Г. В. Жихарева, М. Н. Крамм, Ю. А. Палютина, Н. И. Стрелков, А. И. Черников. № 2017123613 ; заявл. 05.07.2017 ; опубл. 04.18.2018, Бюл. № 11.
12. Патент РФ 2764498. Способ и устройство регистрации множественных отведений электрокардиосигнала / О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, А. Ю. Бодин, Р. Ф. Рахматуллин, Ф. К. Рахматуллин,

- М. И. Сафронов, А. И. Федоренко, А. И. Черников. № 2020122154 ; заявл. 03.07.2020 ; опубл. 17.01.2022, Бюл. № 2.
13. Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Bodin O. N. et al. Reconstruction of Equivalent Electrical Sources on Heart Surface // *Bioinformatics and Biomedical Engineering. IWBBIO. Lecture Notes in Computer Science* / ed. by I. Rojas, F. Ortuño. 2018. Vol 10814. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-78759-6_30
 14. Ramanathan S., Ghanem R. N., Jia P. et al. Electrocardiographic Imaging (ECGI): A Noninvasive Imaging Modality for Cardiac Electrophysiology and Arrhythmia // *Nature Medicine*. 2004. Vol. 10. P. 422–428.
 15. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. М. : Мир, 1987. 524 с.
 16. Гитун Т. В. Инфаркт миокарда. Диагностика, профилактика и методы лечения. М. : ЗАО Центрполиграф, 2004. 156 с.
 17. Бокерия Л. А., Беришвили И. И. Анатомия сердца человека : атлас. М. : Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева, 2012. 90 с.

References

1. *Statistics of cardiovascular diseases*. Available at: [https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/cardio-vascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/cardio-vascular-diseases-(cvds))
2. Preučil T., Novotný M. Low-Cost Portable ECG. *8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) : proceedings – research monograph (June 10th–14th, 2019)*. Budva, Montenegro, 2019:660–663.
3. Petrunina E., Istomina T., Istomin V. et al. Intelligent Information and Measurement System of Monitoring Results and BFB-Trainings. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020: proceedings*. 2020.
4. Macfarlane P.W., van Oosterom A., Pahlm O. et al. *Comprehensive Electrocardiology*. 2nd ed. London: Springer, 2011;1–3:2291.
5. Rakhmatullov F.K. *Chrespishchevodnaya elektrostimulyatsiya serdtsa i klinicheskaya elektrofiziologiya antiaritmicheskikh sredstv = Transesophageal electrical stimulation of the heart and clinical electrophysiology of antiarrhythmic drugs*. Penza: Izd-vo PGU, 2006:111. (In Russ.)
6. Polyakova I.P. Surface ECG mapping as a method of diagnosing cardiac arrhythmias. *Neinvazivnaya diagnostika v klinicheskoy aritmologii: monografiya = Noninvasive diagnostics in clinical arrhythmology : monograph*. Moscow: Meditsina, 2009;6:157–175. (In Russ.)
7. Kramm M.N. Bioelectric features of the transition to an equivalent electrical heart generator for noninvasive electrocardiognostics. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2021;(2):64–72. (In Russ.)
8. Potyagaylo D., Cortes E.G., Schulze W.H.W., Dössel O. Binary optimization for source localization in the inverse problem of ECG. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2014;52:717–728.
9. Bockeria L., Revishvili F., Kalinin F. et al. Hardware and software complex for non-invasive electrophysiological examination of the heart based on solving the inverse problem of electrocardiography. *Med. techn.* 2009;(6):1–7.
10. Onak O.N., Dogrusoz Y.S., Weber G.W. Effects of a priori parameter selection in minimum relative entropy method on inverse electrocardiography problem. *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2018;26(6):877–897.
11. Patent Russian Federation 2651068. *Sposob neinvazivnogo opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa = Method of noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart*. O.N. Bodin, A.Yu. Bodin, G.V. Zhikhareva, M.N. Kramm, Yu.A. Palyutina, N.I. Strelkov, A.I. Chernikov. № 2017123613; appl. 05.07.2017; publ. 04.18.2018, Bull. № 11. (In Russ.)
12. Patent Russian Federation 2764498. *Sposob i ustroystvo registratsii mnozhestvennykh otvedeniy elektrokardiosignala = Method and device for recording multiple leads of an electrocardiosignal*. O.N. Bodin, M.N. Kramm, A.Yu. Bodin, R.F. Rakhmatullov, F.K. Rakhmatullov, M.I. Safronov, A.I. Fedorenko, A.I. Chernikov. № 2020122154; appl. 03.07.2020; publ. 17.01.2022, Bull. № 2. (In Russ.)
13. Zhikhareva G.V., Kramm M.N., Bodin O.N. et al. Reconstruction of Equivalent Electrical Sources on Heart Surface. *Bioinformatics and Biomedical Engineering. IWBBIO. Lecture Notes in Computer Science*. 2018;10814. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-78759-6_30
14. Ramanathan S., Ghanem R.N., Jia P. et al. Electrocardiographic Imaging (ECGI): A Noninvasive Imaging Modality for Cardiac Electrophysiology and Arrhythmia. *Nature Medicine*. 2004;10:422–428.
15. Brebbiya K., Telles Zh., Vroubel L. *Metody granichnykh elementov = Methods of boundary elements*. Moscow: Mir, 1987:524. (In Russ.)
16. Gitun T.V. *Infarkt miokarda. Diagnostika, profilaktika i metody lecheniya = Diagnostics, prevention and treatment methods*. Moscow: ZAO Tsentropoligraf, 2004:156. (In Russ.)
17. Bokeriya L.A., Berishvili I.I. *Anatomiya serdtsa cheloveka: atlas = Human heart anatomy : atlas*. Moscow: Nauchnyy tsentr serdechno-sosudistoy khirurgii im. A.N. Bakuleva, 2012:90. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Михаил Николаевич Крамм**

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)
E-mail: KrammMN@mail.ru

Mikhail N. Kramm

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of radio engineering fundamentals,
National Research University "MPEI"
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Олег Николаевич Бодин

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

Oleg N. Bodin

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

Андрей Юрьевич Бодин

аспирант,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)
E-mail: Bodin98@mail.ru

Andrey Yu. Bodin

Postgraduate student,
National Research University "MPEI"
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Галина Владимировна Жихарева

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)
E-mail: ZhikharevaGV@mpei.ru

Galina V. Zhikhareva

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio engineering fundamentals,
National Research University "MPEI"
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Чьонг Тхи Лан Нхи

магистр, ассистент кафедры основ радиотехники,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)
E-mail: truongthilannhi@gmail.com

Truong Thi Lan Nhi

Master,
assistant of the sub-department
of radio engineering fundamentals,
National Research University "MPEI"
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 15.04.2022

Поступила после рецензирования/Revised 17.05.2022

Принята к публикации/Accepted 20.06.2022

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА «УМНОЙ» ОДЕЖДЫ С ДИСТАНЦИОННЫМ КОНТРОЛЕМ И УПРАВЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОСРЕДСТВОМ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Д. Л. Овчинников¹, А. Ю. Тычков², Д. С. Чернышов³, А. Д. Сашина⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ dmitry_ovch@mail.ru, ² tychkov-a@mail.ru, ³ deniska_1980_13@mail.ru, ⁴ sashina-2016@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Наиболее частой причиной заболевания человека является переохлаждения организма. Решить данную проблему можно путем использования «умной» одежды с возможностью контроля температуры и адаптации под окружающие внешние условия. Целью настоящей работы является разработка прототипа «умной» одежды с дистанционным контролем и управлением температурой. *Материалы и методы.* При разработке устройства предпочтение в элементной базе отдано микроконтроллеру ESP-32 со встроенными модулями передачи (Wi-Fi, Bluetooth). ESP-32 обладает необходимыми характеристиками: рабочая температура, встроенный термодатчик, возможность использования интерфейса 1-Wire, поддержка протокола Bluetooth Low Energy (BLE). Для точного определения температуры вне контроллера выбраны датчики с высокой точностью и широким диапазоном измерения (± 1 °C, от -55 °C до $+125$ °C), а также малыми размерами корпуса DS18B20. В качестве стабилизатора напряжения для контроллера и датчиков используется стабилизатор LM317. Все компоненты используются в chip исполнении для минимизации размеров устройства. *Результаты и выводы.* По результатам микроэлектронного исполнения устройства определены необходимые для минимального функционала датчики и разработан алгоритм работы изделия. Устройство обладает малыми размерами ($75 \times 48 \times 22$ мм), питание осуществляется от powerbank с выходным напряжением 5 В и током не менее 2,1 А, зональная температура нагрева до 40 °C. Время работы изделия при включенных нагревателях составляет 8–10 ч, за счет управления силовыми ключами ШИМ время можно увеличить, уменьшив степень нагрева.

Ключевые слова: микроэлектроника, контроль температуры, обработка информации, текстильная промышленность

Для цитирования: Овчинников Д. Л., Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Сашина А. Д. Разработка прототипа «умной» одежды с дистанционным контролем и управлением температурой посредством микроэлектронного исполнения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 102–109. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-13

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF "SMART" CLOTHING WITH REMOTE CONTROL AND TEMPERATURE CONTROL BY MEANS OF MICROELECTRONIC DESIGN

D.L. Ovchinnikov¹, A.Yu. Tychkov², D.S. Chernyshov³, A.D. Sashina⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ dmitry_ovch@mail.ru, ² tychkov-a@mail.ru, ³ deniska_1980_13@mail.ru, ⁴ sashina-2016@inbox.ru

Abstract. *Background.* The most common cause of human disease is hypothermia of the body. This problem can be solved by using «smart» clothes with the ability to control temperature and adapt to the surrounding external conditions. The purpose of this work is to develop a prototype of «smart» clothing with remote control and temperature control. *Materials and methods.* When developing the device, preferences in the element base are given to the ESP-32 microcontroller with built-in transmission modules (Wi-Fi, Bluetooth). ESP-32 has the necessary characteristics: operating temperature, built-in thermal sensor, the ability to use the 1-Wire interface, support for Bluetooth Low Energy (BLE) protocol. To accurately determine the temperature outside the controller, sensors with high accuracy and a wide measurement range (± 1 °C, from -55 °C to $+125$ °C), as well as the small dimensions of the DS18B20 case are selected. The LM317 stabilizer is used as a voltage stabilizer for the controller and sensors. All components are used in chip design to minimize the size of the device. *Results and conclusions.* Based on the results of the microelectronic design of the

device, the sensors necessary for the minimum functionality were determined and an algorithm for the operation of the product was developed. The device has a small size (75 × 48 × 22 mm), powered by a powerbank with an output voltage of 5 volts and a current of at least 2.1 amperes, zonal heating temperature up to 40 °C. The operating time of the product with the heaters turned on is 8–10 hours, due to the control of PWM power keys, the time can be increased by reducing the degree of heating.

Keywords: microelectronics, temperature control, information processing, textile industry

For citation: Ovchinnikov D.L., Tychkov A.Yu., Chernyshov D.S., Sashina A.D. Development of a prototype of "smart" clothing with remote control and temperature control by means of microelectronic design. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):102–109. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-13

Введение

Развитие современных технологий позволяет людям создавать инновационные решения, начиная от тяжелой техники для горнодобывающей промышленности до предметов, встречающихся в повседневной жизни. Так, одним из быстро развивающихся технологических направлений является текстильная промышленность.

Человеческая жизнь требует все больше нововведений и функциональной оснащённости одежды. Для заботы о здоровье, защиты от плохой погоды, работы с мобильными устройствами по беспроводной сети разрабатывается множество различных материалов, способных оценивать состояние человека, передавать данные на электронные устройства, а также отслеживать изменения климата вокруг человека. Благодаря этому в будущем каждый сможет пользоваться «умным» текстильным изделием [1].

В настоящее время известна следующая классификация текстильных материалов [1]: пассивные, активные и «умные». Однако не все известные решения и технологии находятся в свободном доступе.

Благодаря новым технологиям использование умной микроэлектроники в составе одежды набирает обороты не только в индустрии моды, но и в других направлениях отрасли: здравоохранение, военное дело, профессиональный спорт, форма потенциально опасных производств.

Анализ предметной области

Влияние новых технологий на текстильную промышленность не ограничивается разработкой и производством одежды. Теперь данная технология становится частью промышленного текстиля.

Будущее повседневной одежды становится электронным. Так, в ближайшие годы носимая электроника будет иметь меньшие размеры в сравнении с существующими аналогами. Новые электронные ткани будут обладать революционной способностью чувствовать, действовать, хранить, излучать и перемещаться. Достаточно вспомнить функции биомедицинского мониторинга или новые человеко-машинные интерфейсы. В «умную» ткань можно встраивать множество датчиков и исполнительных устройств. И при этом может быть использована существующая инфраструктура текстильной промышленности [2].

«Умную» электронику, типа фитнес-браслетов и смарт-часов, можно удобно и легко носить, она работает круглосуточно в фоновом режиме на протяжении долгого времени, а также регистрирует показатели здоровья.

Одним из важнейших факторов, играющих роль в формирующейся индустрии электронного текстиля, является развитие нанотехнологий. Новые наноматериалы, обладающие внутренней проводимостью, такие как углеродные нанотрубки, графен и другие, позволят соединять управляющий измерительный блок с периферийными устройствами.

Благодаря развитию технологии Интернета вещей (IoT) [3] в ткани могут быть встроены ультратонкие, гибкие и прозрачные датчики, исполнительные механизмы, электроника, а также устройства для выработки или хранения энергии с использованием нанотехнологий. По мере того, как эти электронные компоненты становятся все меньше и практически невидимыми, электронный текстиль с автономным питанием (e-textiles) будет варьироваться от «умной» моды до «умной» одежды для фитнеса. В источнике литературы [4] отмечается, что

исследователи встраивают метаматериалы в одежду, чтобы повысить уровень сигнала между носимыми электронными устройствами.

На данный момент большая часть «изысканной» одежды производится из прогрессивного текстиля с переплетенными схемами. Внедряются датчики и дополнительное оснащение для использования смарт-функций. Так, «умная» одежда может подключаться к приложениям на смартфонах или программному обеспечению на дополнительных устройствах, таких как ноутбуки и персональные компьютеры без проводов, используя протоколы Bluetooth или Wi-Fi [2].

С помощью измерительных датчиков «интеллектуальная» одежда собирает показатели активности и ключевые биометрические данные, которые отправляются в приложения под управлением искусственного интеллекта на смартфон. Данная технология позволит помочь улучшить свое здоровье и производительность человека, а в чрезвычайных ситуациях отправить информацию о местоположении и состоянии потерпевшего в службу спасения [5].

Беспроводное подключение не является обязательным для отнесения одежды к типу «умной» одежды. Соединение с помощью кабеля позволит использовать устройство при слабых источниках энергии, а также сэкономить при производстве за счет уменьшения необходимых для устройства элементов деталей. Однако подобный способ подключения гораздо менее удобный и практичный для конечного пользователя [2].

В книге «Crafting wearables» [6] говорится, что в середине XX в. математики-энтузиасты изобрели ботинок с возможностью обмануть рулетку в казино (при помощи счетчика времени, радиоволн и наушника).

Основным периодом развития подобных технологий стали 80–90-е гг. прошлого столетия, чему способствовали быстроразвивающиеся компьютерные технологии [7]. С приходом электронной ткани (e-textile) и мягкой электроники (soft electronics) в 1998–2000 г. одежда стала проектироваться с интегрированными свойствами компьютера и из специальных материалов [8].

В сотрудничестве с Levi's [2] разработаны специальные нити, производящие электричество. Нити с токопроводимостью, не вступающие в реакцию с влагой, позволяют управлять телефоном или иным гаджетом через специальную программу (рис. 1). Например, включать и выключать музыку можно будет при помощи жеста.

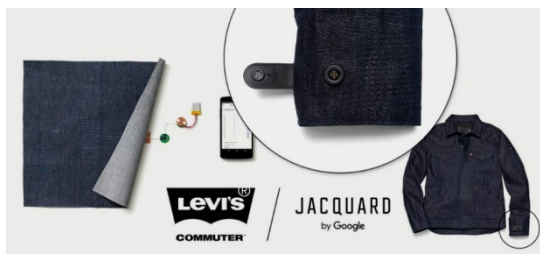


Рис. 1. Куртка The Commuter из «умного» материала для управления смартфоном

В 2011 г. Adidas представил бутсы Adizero f50 с чипом [2], которые в режиме реального времени позволяют отслеживать действия футболистов на поле (рис. 2): измерять скорость бега, темп движения, сердцебиение, различные технические параметры. Впоследствии, проанализировав информацию, игрок или тренер могут сделать необходимые выводы и принять соответствующие рекомендации. Louis Vuitton в 2019 г. (рис. 3) [9] разработал сумку со встроенным экраном, на котором можно воспроизвести видео или фото.



Рис. 2. Бутсы Adidas Adizero f50 со встроенной системой miCoach

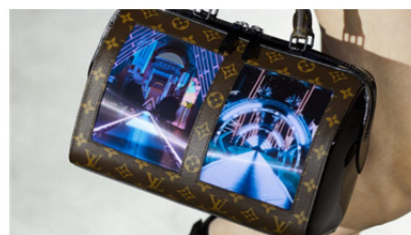


Рис. 3. Сумка Louis Vuitton со встроенным экраном

Предлагаемое решение

Перспективной нишей пользователей «умной» одежды являются компании сферы обслуживания. К примеру, число сотрудников в сфере продаж на 2020 г. составляет более 700 тысяч человек (при расчете использовались данные наиболее крупные компании: «Пятерочка» (X5 Retail Group), «Магнит», «Лента») [10]. Сотрудники данной отрасли часто подвержены заболеваниям, связанными с переохлаждением организма: в большинстве магазинов кассы находятся около выхода, следовательно, холодный воздух с улицы довольно свободно проникает внутрь. Также данную проблему можно обнаружить в больших залах таких магазинов, как «Лента», «Metro», «Leroy Merlin» и др. В таких помещениях сложно постоянно поддерживать комфортную для человека температуру.

Одним из вариантов решения будет установка специального оборудования с датчиками температуры, разбросанными по всей площади магазина. Однако это потребует больших затрат на установку и настройку системы, и на ее обслуживание. Но контроль температуры с помощью датчиков можно сделать целенаправленным – поддерживать комфортную температуру для каждого человека.

Таким образом решить сформулированную проблему можно путем использования «умной» одежды с датчиками и нагревательными элементами, способными обеспечить правильную и своевременную регуляцию температуры. Такая одежда сможет подстраиваться под окружающую среду, место нахождения пользователя.

Для создания «умной» одежды необходимо использовать микроконтроллер, способный обрабатывать необходимый объем информации в реальном времени и принимать на ее основе верные решения. Кроме того, для получения данных об окружающей среде нужны дополнительные измерительные датчики. Добавляя большее число источников информации, мы получаем возможность реализовывать зональный контроль, автоматическую адаптацию под окружающую среду и т.д. Перечень датчиков не ограничивается только температурными сенсорами и может включать датчики сердечного пульса, артериального давления, влажности, атмосферного давления, акселерометра, гироскопа, GPS и многие другие [11].

Получив и обработав информацию с измерительных датчиков, контроллеру необходимо сверить определенные значения с контрольными значениями и на их основе принять решение. Для этого можно использовать различные аналоговые и цифровые устройства ввода: переменные резисторы, энкодеры, кнопки, сенсорные панели и пр. Данную функцию можно реализовать с помощью беспроводной связи со смартфоном, например, через Bluetooth или Wi-Fi. В этом случае необходимо либо использовать контроллер со встроенным модулем передачи информации, либо использовать дополнительное устройство. Управление с телефона позволит увеличить функционал «умной» одежды за счет гибкой настройки под каждого пользователя.

Приняв заданные и полученные значения, микроконтроллер должен воплотить определенные инструкции. Так, для подачи напряжения на нагревательные элементы используется реле. Однако данный способ даст ограниченный функционал устройства – будут доступны только два режима «включен» или «выключен». Решить проблему можно с помощью приборов на основе полупроводников – силовых или полевых транзисторов. Благодаря их свойствам появляется возможность использовать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ). Увеличивая или уменьшая процент заполнения, происходит управление степенью нагрева элемента. Пример с разным процентом заполнения можно увидеть на рис. 4. Чем больше промежутков с высоким уровнем сигнала – логической единицей, тем сильнее идет нагрев. И наоборот, чем больше участков с логическим нулем, тем слабее и меньше элемент будет греться. Помимо этого, остаются доступны и режимы «включен»/«выключен».

Увеличив количество транзисторов, можно повысить функционал «умной» одежды, а именно: увеличить количество самостоятельных зон нагрева или повысить максимальную мощность устройства за счет объединения нескольких транзисторов в «параллель», добавить элементы световой индикации в виде светодиодов или светодиодных лент на поверхность одежды.

В качестве источника энергии для устройства подойдет любой современный powerbank, имеющий порт с выдаваемым током не менее 2 А. Однако в этом случае необходим точный расчет сопротивления нагревательного элемента для наиболее эффективной работы, так как выходное напряжение составляет 5 В. При таких параметрах возможно реализовать 9–10 Вт

полезной мощности с учетом потерь и затрат на питание микроконтроллера с периферией. Стандарт быстрой зарядки Quick Charge 4 способен выдавать мощность до 100 Вт, однако большая часть блоков питания/зарядки обладают мощностью около 18 Вт. Дополнительно предлагается использовать разъемы, способные пропускать через себя большие токи, например, USB type-C, позволяющий течь через себя току около 3 А.

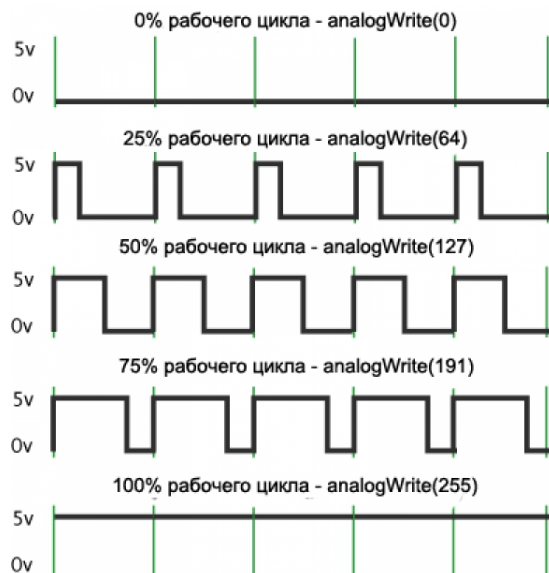


Рис. 4. Пример разного процента заполнения при ШИМ

Типовая схема устройства выглядит следующим образом (рис. 5).

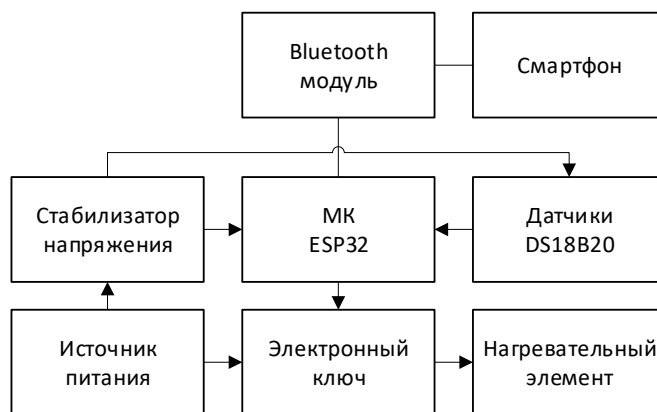


Рис. 5. Типовая схема «умной» одежды с автоматическим подогревом

От источника питания посредством провода происходит подключение к основной плате устройства. Для работы микроконтроллера и датчиков, выбранных в данной схеме, необходимо напряжение в 3,3 В, что обеспечивается с помощью стабилизатора. Контроллер, получая информацию с датчиков и контрольные значения параметров с приложения на смартфоне, обрабатывает ее и подает соответствующую команду на электронный ключ (силовой/полевой транзистор), который, в свою очередь, подключается к нагревательному элементу и напрямую к проводам с источника питания. Обмен данными с приложением на телефоне реализуется с помощью протокола Bluetooth Low Energy, на котором работают все современные смарт-часы и фитнес-браслеты. Он позволяет телефону тратить меньшее количество энергии на взаимодействие с сторонними устройствами, тем самым повышая время работы от аккумулятора.

Блок-схема программного обеспечения «умной» одежды приведена на рис. 6. Для обмена данными с телефоном используется приложение Blynk, доступное для Android, IOS. Для избежания непредвиденных последствий, вызванных неконтролируемым включением нагре-

вательного элемента, на все выходы подается логический ноль, где происходит инициализация датчиков и первичное получение значений с них.

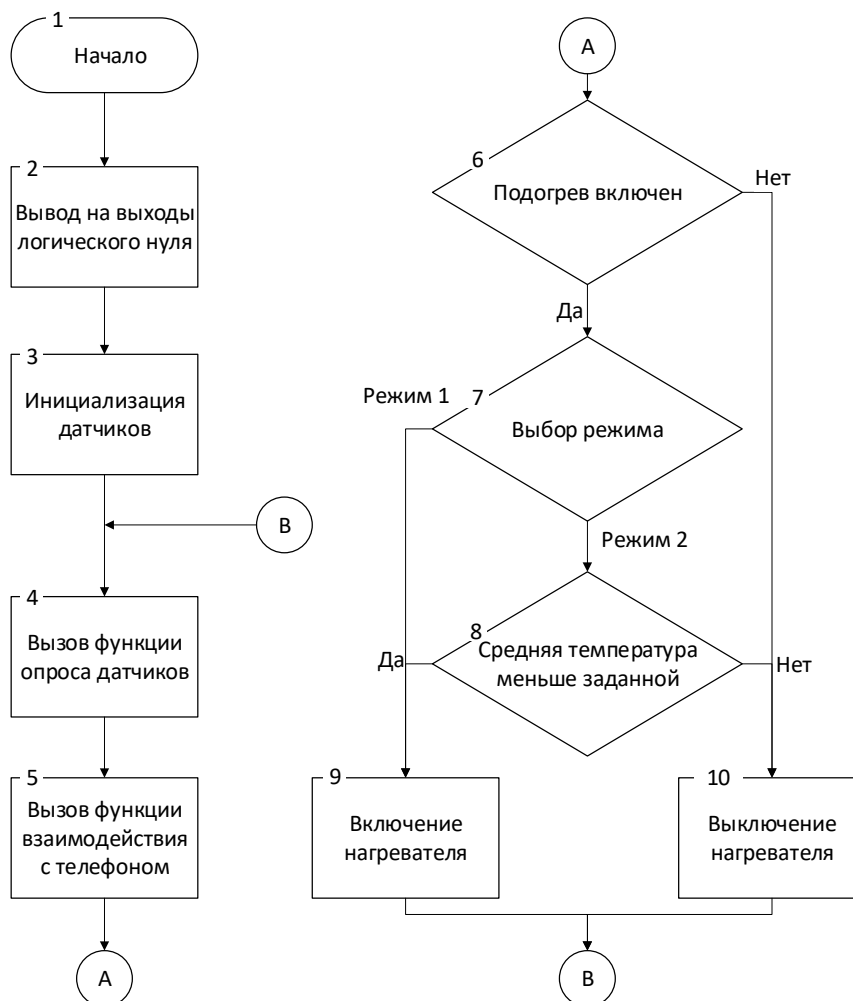


Рис. 6. Пример блок-схемы программы для «умной» одежды с автоматическим подогревом

Заключение

Подводя итоги, можно сказать, что «умная» одежда на данный момент времени только начинает развиваться. Однако данное направление текстильной промышленности обладает огромным потенциалом. Так, от переохлаждения человека можно будет защитить, не только увеличивая количество утепленных слоев, но и встроив вместо них слой с токопроводящими нитями для нагрева. Это позволит уменьшить затраты на материалы, так как их потребуется гораздо меньше, чем в «классическом» варианте.

Для управления такими устройствами можно будет использовать смартфоны, которые в современном мире есть почти у каждого. Для реализации этой задумки нужно использовать микроконтроллеры с поддержкой беспроводных интерфейсов. Один из контроллеров, обладающий необходимыми характеристиками, – ESP-32. Он может соединяться с телефоном по протоколу Bluetooth Low Energy, что в эпоху смарт-часов и фитнес-браслетов наиболее актуально, ведь они также работают на данном протоколе. Датчики температуры DS18B20 позволят получать точные и достоверные данные всего по одному проводу, что многократно упростит производство и сборку.

Таким образом, устройство будет иметь весь необходимый функционал, а также большие возможности для модернизации, при этом использовать довольно простой алгоритм управления. Благодаря данным преимуществам эта идея имеет огромный потенциал для реализации в виде многосерийного производства.

Список литературы

1. Matteo S., Alessandro C. Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review // *Sensors*. 2014. № 14. P. 11957–11992.
2. Кусимидинова М. Х., Решетникова Н. С. «Умная одежда» как пример актуальной коллаборации современных информационных технологий и индустрии моды // *Каспийский регион: политика, экономика, культура*. 2020. № 4. С. 134–140.
3. «Умная» одежда и нательные технологии. // *Habr*. URL: <https://habr.com/ru/company/dataart/blog/387217/> (дата обращения: 15.09.2022).
4. Moradi B., Fernández-García R., Gali I. G. E-Textile Metamaterials: Stop Band Pass Filter // *Applied Sciences*. 2021. № 11. P. 10930.
5. Технологии в кармане: умная одежда и электронный текстиль // *Теории и практики*. URL: <https://theoryandpractice.ru/posts/1724-tekhnologii-v-karmane-umnaya-odezhda-i-elektronnyu-tekstil> (дата обращения: 15.09.2022).
6. Guler S., Gannon M., Sicchio K. *Crafting Wearables: Blending Technology with Fashion*. CA : Apress, 2016. 229 p.
7. Кутырев А. В. Развитие компьютерных технологий в СССР. Вторая половина 1970-х – начало 1980-х гг. // *Экономический журнал*. 2005. № 1. С. 161–173.
8. Henry M. *Wearable Technology: an Overview of the Patent Landscape*. 2019. URL: <https://henry.law/blog/wearable-technology-patent-landscape/> (дата обращения: 09.08.2022).
9. Koerich G. H., Trevisol N. P., De Souza R. P. L. Luxury and technology: a phenomenological analysis of the Louis Vuitton designer handbags Canvas of the Future // *Modapalavra e-periódico*. 2020. № 29. P. 203–228.
10. Лента (LENT) численность персонала // *SMART-LAB*. URL: <https://smart-lab.ru/q/LENT/MSFO/employees/> (дата обращения: 20.01.2022).
11. Самарин А. Электроника, встроенная в одежду, – технологии и перспективы // *Компоненты и технологии*. 2007. № 4. С. 221–228.

References

1. Matteo S., Alessandro C. Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review. *Sensors*. 2014;(14):11957–11992.
2. Kusimidinova M.Kh., Reshetnikova N.S. "Smart clothes" as an example of an actual collaboration of modern information technologies and fashion industry. *Kaspiyskiy region: politika, ekonomika, kul'tura = Caspian region: politics, economics, culture*. 2020;(4):134–140. (In Russ.)
3. "Smart" clothing and wearable technologies. *Habr*. (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/company/dataart/blog/387217/> (accessed 15.09.2022).
4. Moradi B., Fernández-García R., Gali I.G. E-Textile Metamaterials: Stop Band Pass Filter. *Applied Sciences*. 2021;(11):10930.
5. Technologies in your pocket: smart clothing and electronic textiles. *Teorii i praktiki = Theories and practices*. (In Russ.). Available at: <https://theoryandpractice.ru/posts/1724-tekhnologii-v-karmane-umnaya-odezhda-i-elektronnyu-tekstil> (accessed 15.09.2022).
6. Guler S., Gannon M., Sicchio K. *Crafting Wearables: Blending Technology with Fashion*. CA: Apress, 2016:229.
7. Kutyrev A.V. Development of computer technologies in the USSR. The second half of the 1970s – early 1980s. *Ekonomicheskii zhurnal = Economic Journal*. 2005;(1):161–173. (In Russ.)
8. Henry M. *Wearable Technology: an Overview of the Patent Landscape*. 2019. Available at: <https://henry.law/blog/wearable-technology-patent-landscape/> (accessed 09.08.2022).
9. Koerich G.H., Trevisol N.P., De Souza R.P.L. Luxury and technology: a phenomenological analysis of the Louis Vuitton designer handbags Canvas of the Future. *Modapalavra e-periódico*. 2020;(29):203–228.
10. Tape (LENT) number of staff. *SMART-LAB*. (In Russ.). Available at: <https://smart-lab.ru/q/LENT/MSFO/employees/> (accessed 20.01.2022).
11. Samarin A. Electronics, built-in clothing – technologies and prospects. *Komponenty i tekhnologii = Components and technologies*. 2007;(4):221–228. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Леонидович Овчинников
студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitry_ovch@mail.ru

Dmitry L. Ovchinnikov
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

Alexander Yu. Tychkov

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

Денис Сергеевич Чернышов

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: deniska_1980_13@mail.ru

Denis S. Chernyshov

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

Алина Дмитриевна Сашина

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sashina-2016@inbox.ru

Alina D. Sashina

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 13.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 15.06.2022

Принята к публикации/Accepted 18.07.2022

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

О. Н. Бодин¹, М. В. Едемский², Н. Э. Кручинина³, Н. А. Сержантова⁴

^{1,3,4} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ bodin_o@inbox.ru, ² misha.f.2015@mail.ru, ³ kruchininane@gmail.com, ⁴ itmmbpsgta@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Вторая половина XX и XXI в. характеризуются различными видами техногенных, социальных, антропогенных и природных катаклизмов. Наиболее значимой стороной всех катастроф является гибель людей. Анализ всех катастроф приводит к выводу, что медицинские системы недостаточно подготовлены к оказанию помощи в условиях чрезвычайных ситуаций. В статье рассматриваются особенности функционирования медицинских информационных систем в условиях чрезвычайной ситуации, а также предлагается способ оказания экстренной кардиологической помощи. *Материалы и методы.* Использовались методы построения информационно-измерительных систем, теоретические основы медицины катастроф и электрокардиографии, методы статистической обработки сигналов, цифровой обработки сигналов, а также методы математического моделирования. *Результаты.* Предложен подход для создания медицинской информационной системы двойного назначения. Данный подход позволяет медицинской информационной системе функционировать в двух режимах работы: в нормальных условиях и в условиях чрезвычайной ситуации. В нормальных условиях для оценки функционального состояния организма предлагается использовать технологию цифрового двойника сердца как виртуальную персонализированную модель сердечно-сосудистой системы, созданной для имитации ее функционирования с учетом процессов регуляции и двухсторонних информационных связей с пациентом. Для экстренного оказания медицинской помощи в условиях чрезвычайной ситуации авторами предложено использование портативных кардиоанализаторов. Разработан способ оказания экстренной кардиологической помощи. *Выводы.* Использование предложенной медицинской информационной системы позволит повысить эффективность системы здравоохранения за счет унификации методов и средств оказания кардиологической помощи.

Ключевые слова: медицинская информационная система, чрезвычайная ситуация, портативный кардиоанализатор, электрическая активность сердца, цифровой двойник сердца, кардиологическая помощь

Для цитирования: Бодин О. Н., Едемский М. В., Кручинина Н. Э., Сержантова Н. А. Особенности функционирования медицинской информационной системы в условиях чрезвычайной ситуации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 110–118. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-14

FEATURES OF THE FUNCTIONING OF THE MEDICAL INFORMATION SYSTEM IN THE CONDITIONS OF EMERGENCY SITUATION

O.N. Bodin¹, M.V. Edemskiy², N.E. Kruchinina³, N.A. Serzhantova⁴

^{1,3,4} Penza State Technological University, Penza, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

¹ bodin_o@inbox.ru, ² misha.f.2015@mail.ru, ³ kruchininane@gmail.com, ⁴ itmmbpsgta@yandex.ru

Abstract. *Background.* The second half of the XX and XXI centuries are characterized by various types of man-made, social, anthropogenic and natural disasters. The most significant side of all disasters is the loss of life. An analysis of all disasters leads to the conclusion that medical systems are not sufficiently prepared to provide assistance in emergency situations. The article discusses the features of the functioning of the medical information system in an emergency situation, and also suggests a way to provide emergency cardiological care. *Materials and methods.* Methods of building information and measurement systems, theoretical foundations of disaster medicine and electrocardiography, methods of statistical signal processing, digital signal processing, as well as methods of mathematical modeling were used. *Results.* An approach for creating a dual-use medical information system is proposed. This approach allows the medical information system to function in two modes of operation: under normal conditions and in an emergency situation. Under normal conditions, to assess the functional state of the body, it is proposed to use the technology of the digital double of the heart as a virtual personalized model of the cardiovascular system, created to simulate its functioning, taking into account the processes of regulation and two-way information links with the patient. For emergency medical care in an

emergency situation, the authors proposed the use of portable cardiac analyzers. A method of providing emergency cardiological care has been developed. *Conclusions.* The use of the proposed medical information system will improve the efficiency of the healthcare system by unifying methods and means of providing cardiological care.

Keywords: medical information system, emergency, portable cardioanalyzer, electrical activity of the heart, digital double of the heart, cardiological care

For citation: Bodin O.N., Edemskiy M.V., Kruchinina N.E., Serzhantova N.A. Features of the functioning of the medical information system in the conditions of emergency situation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):110–118. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-14

Введение

Развернувшаяся в XX в. беспрецедентная по масштабам инженерная деятельность и вызванные ею изменения природной сферы резко увеличили возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного и природно-техногенного характера. Наиболее трагичной стороной катастроф является гибель людей.

В связи с этим первостепенное значение имеет организация ликвидации медицинских последствий ЧС и научного обоснования деятельности медицины катастроф. Катастрофы, которые произошли в последние годы в мире, показали недостаточную подготовленность системы здравоохранения к оказанию экстренной медицинской помощи (ЭМП) [1]. Целью статьи является разработка медицинской информационной системы (МИС) двойного назначения: в нормальных условиях и в условиях ЧС на основе типовой структуры МИС путем добавления способов и средств, обеспечивающих ЭМП в течение «золотого часа» медицины катастроф.

Материалы и методы

МИС в условиях ЧС призвана обеспечить сокращение уровня летальности пострадавших путем одновременного принятия сортировочных решений, выдачи рекомендаций по экстренному оказанию помощи, введения индивидуального и обобщенного учета медицинских данных [2]. Все это должно быть выполнено в рамках «золотого часа» медицины катастроф. Для этого авторы предлагают в состав типовой структуры МИС включить мобильный телемедицинский комплекс (МТМК) (рис. 1).

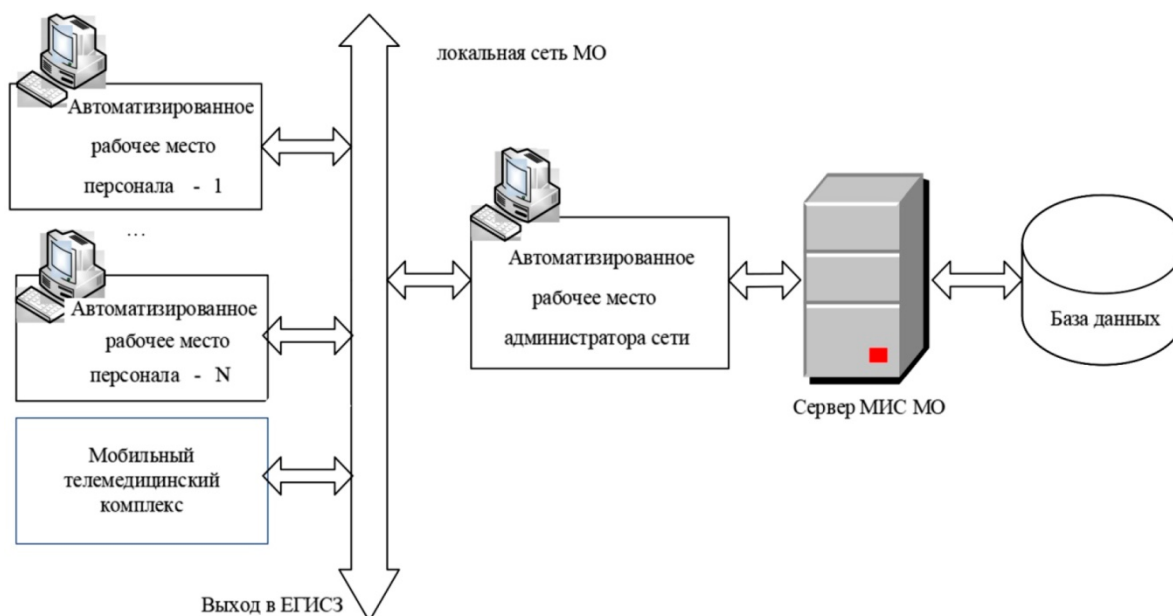


Рис. 1. Структура предлагаемой МИС

Состав типовой МИС определяется размерами и структурой медицинской организации (МО) и включает подсистемы, обеспечивающие необходимые для каждого случая функциональные возможности. Набор подсистем определяется структурой МО и уровнем внедрения МИС. Каждая подсистема характеризуется набором функций, позволяющих на более высоком уровне оказывать медицинскую помощь, используя достижения в медицине и технике.

Основой этой системы являются автоматизированные рабочие места (АРМ) персонала (врачей-специалистов, медицинских регистраторов, экономистов, руководителей и пр.). Данные АРМ предназначены для автоматизации выполнения обязанностей персонала МИС. С помощью АРМ происходит организация доступа к информационной системе для каждого медицинского работника (врача, фельдшера, лаборанта, медицинской сестры). Любое АРМ специализировано для выполнения строго конкретных профессиональных задач и работы с установленной медицинской документацией. Обеспечивает работу всех АРМ – сервер, который является основным вычислительным ресурсом МИС [6].

По мнению авторов, для функционирования МИС в условиях ЧС необходим мобильный телемедицинский комплекс (МТМК) (рис. 2). МТМК представляет собой смонтированный на шасси повышенной проходимости или любом другом транспортном средстве комплекс диагностической медицинской и телекоммуникационной аппаратуры, включая спутниковую связь. Ключевой особенностью МТМК является наличие гетерогенной группы беспилотных воздушных судов (ГГ БВС) [7]. Оснащение МТМК позволяет передавать при необходимости данные обследований в цифровой форме в центральные медицинские учреждения, где врачи и высококвалифицированные специалисты анализируют эти данные и сообщают персоналу МТМК необходимые заключения и рекомендации.



Рис. 2. Мобильный телемедицинский комплекс

МТМК оборудованы всем необходимым для длительной автономной работы даже в условиях недостатка или полного отсутствия необходимой медицинской и телекоммуникационной инфраструктуры.

Внедрение в условиях ЧС в МИС блока МТМК необходимо для автоматизации «медицинской сортировки», индивидуального учета и обобщения данных о пострадавших, оценки и прогноза тяжести состояния пострадавшего, выдачи правильных рекомендаций, а также оперативного принятия оптимальных решений по спасению и эвакуации пострадавших. На рис. 3 приведена структурная схема МТМК.

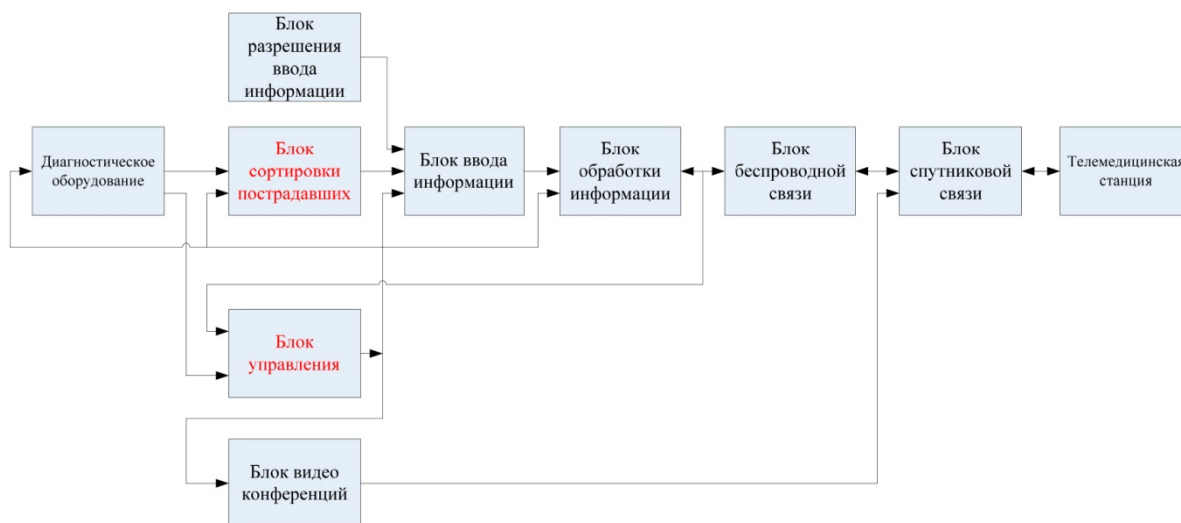


Рис. 3. Структурная схема МТМК

МТМК содержит модули телекоммуникационного и медицинского диагностического оборудования, представляющие собой набор блоков, каждый из которых включает оборудование и аппаратуру определенного функционального назначения. При этом модуль телекоммуникационного оборудования состоит из блока спутниковой связи, обеспечивающего прием-передачу информации между мобильным комплексом и телемедицинской станцией, и блока беспроводной связи. Блок беспроводного доступа предназначен для обеспечения приема-передачи информации между блоком спутниковой связи и модулем многофункциональной мобильной телемедицинской укладки. Модуль многофункциональной мобильной телемедицинской укладки состоит, в свою очередь, из базового модуля-компьютера, предназначенного для сбора, обработки, хранения и приема-передачи информации медико-диагностического характера и блока ввода информации в базовый модуль, содержащего устройство высококачественной оцифровки, систему видеоконференцсвязи, а также придаваемое медицинское оборудование [3].

Для своевременной регистрации электрокардиосигнала (ЭКС) авторами предлагается использование портативных кардиоанализаторов (ПКА) (рис. 4). Благодаря использованию ПКА осуществляется мониторинг состояния сердца.

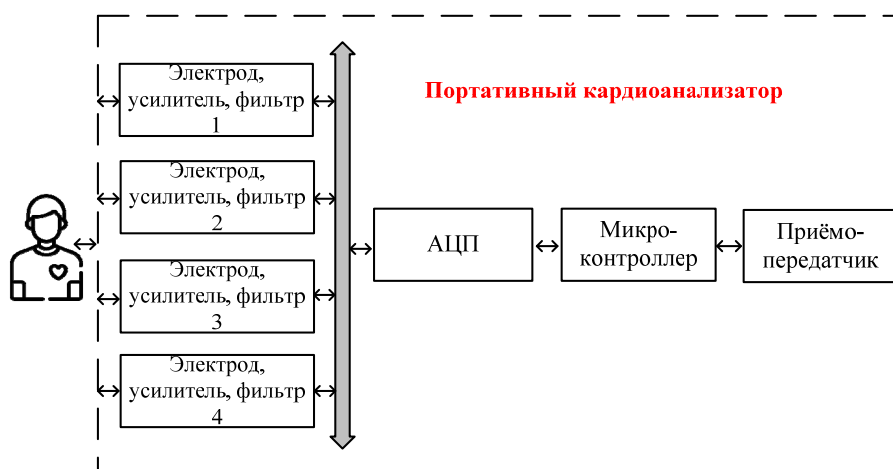


Рис. 4. Портативный кардиоанализатор

Портативный кардиоанализатор предназначен для диагностики состояния сердца в условиях свободной двигательной активности пациента и состоит из регистратора электрокардиосигнала (ЭКС) с внешними липкими электродами и микроконтроллера с блоками усиления, фильтрации и аналого-цифрового преобразования ЭКС, а также модуля для работы с мобильными сетями [8].

Основной задачей является регистрация ЭКС с помощью портативного устройства в течение продолжительного времени при обычном образе жизни (свободной активности) пациента и предупреждение сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ). Принцип работы ПКА основан на прямом измерении электрического потенциала сердца с помощью электродов, закрепленных на торсе пациента, и последующем анализе ЭКС. Благодаря суточному мониторингованию сердца возможно выявить или предупредить развитие следующих ССЗ:

- аритмия (нарушения сердечного ритма);
- стенокардия;
- ишемическая болезнь сердца.

Анализ современных МИС показывает, что внедрение технологии цифрового двойника (ЦД) в МИС в условиях ЧС сможет решить множество проблем, при этом осуществляя переход к медицине превентивной, профилактической и индивидуализированной.

Цифровой двойник представляет собой цифровую виртуальную модель физического объекта для имитации его функционирования (поведения). Концепция ЦД основана на моделировании реальных объектов со всеми параметрами, функциональностью и поведением с использованием цифровых инструментов.

Предполагается, что пациенту создается ЦД, который содержит информацию о биологических данных, генетике, образе жизни прототипа. В периоды болезни человек приходит к врачу. Врач заносит симптоматику пациента в базу ЦД, ставит диагноз и назначает ЦД лечение. Далее врач смотрит, как именно лечение повлияло на ЦД, и если оно было неэффектив-

ным, то назначает другое лечение, пока не найдет то, что лучше всего поможет. И именно этот, наиболее эффективный вариант будет предложен пациенту. В дальнейшем нейросеть, которая ответственна за существование ЦД, сохранит данные о болезни пациента и модифицирует ЦД в соответствии с ними. Благодаря самообучению ЦД сможет строить предсказательные модели о своем будущем «здоровье», а значит, и о здоровье пациента [4].

Результаты и обсуждение

В нормальных условиях эксплуатации МИС предназначена для информационного обеспечения процессов:

- оказания медицинской помощи на уровне МО;
- ведение ЭМК пациента;
- управления МО (административно-хозяйственного, экономического, юридического и пр.);
- взаимодействия с пациентами (запись и самозапись на прием к врачу, информационное наполнение личного кабинета пациента, выдачи электронных копий медицинских документов и пр.);
- взаимодействия между различными МО (оказание и/или получение медицинской помощи, проведение лабораторных и диагностических обследований и пр.);
- взаимодействия с региональными и/или федеральными информационными ресурсами для обмена информацией.

Авторами предлагается способ оказания экстренной кардиологической помощи (ЭКП). В табл. 1 приведены условия и методы оказания ЭКП.

Таблица 1

Условия и методы оказания ЭКП

Наличие патологических признаков		Методы оказания экстренной кардиологической помощи	
ФВ < 50 %	Три последующих кардиоцикла с желудочковыми экстрасистолами	Дефибрилляция	Реваскуляризация
+	+		
–	+	+	–
+	–	–	+
–	–	–	–

Алгоритм работы способа ЭКП представлен на рис. 5.

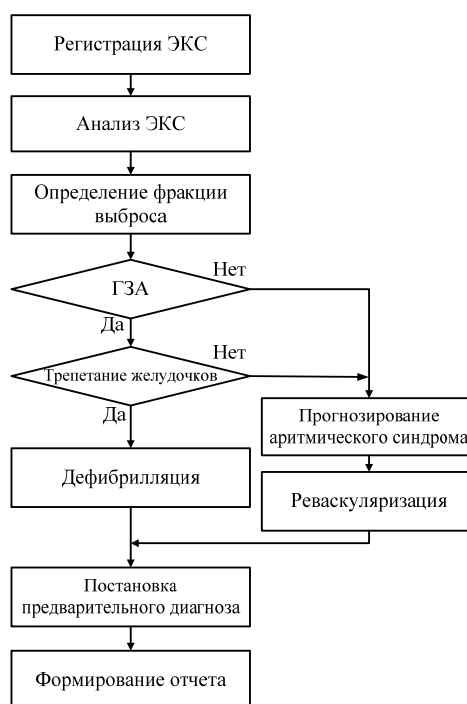


Рис. 5. Алгоритм работы способа оказания ЭКП

Предлагаемый авторами способ оказания ЭКП включает в себя следующие действия:

- регистрация ЭКС;
- анализ ЭКС;
- определение фракции выброса;
- проверка наличия гемодинамически значимой аритмии (ГЗА);
- проверка наличия трепетания желудочков;
- проведение дефибрилляции в случае обнаружения ГЗА и трепетания желудочков;
- прогнозирование степени тяжести аритмического синдрома;
- проведение ревазуляризации в случае отсутствия ГЗА;
- постановка предварительного диагноза;
- формирование отчета.

Опишем введенные действия.

Прежде всего, после регистрации и анализа параметров ЭКС осуществляется определение ФВ электрокардиографическим методом каждые тридцать секунд.

Для этого по формулам (1) определяют КДО, КСО – конечный диастолический и систолический объемы левого желудочка соответственно:

$$\text{КДО} = \frac{4}{3}\pi\text{КДР}^3; \quad \text{КСО} = \frac{4}{3}\pi\text{КСР}^3. \quad (1)$$

Далее определяют КДР, КСР – конечный диастолический и систолический радиусы левого желудочка соответственно:

$$\text{КДР} = (44,5 - 100t_{RS})(t_{QR} + t_{RS}) - 11t_{RS}, \quad (2)$$

где t_{QR} – время от начала зубца Q до вершины зубца R при отсутствии блокады левой ножки пучка Гиса, а при наличии блокады левой ножки пучка Гиса – до первой вершины раздвоенного зубца $R(R_1)$, т.е. $t_{QR} = t_{QR}$, с; t_{RS} – время от вершины зубца R до конца зубца S – при отсутствии блокад ножек пучка Гиса, а при блокаде левой ножки пучка Гиса вместо t_{RS} – разность временных интервалов от первой вершины раздвоенного зубца R до конца зубца S ($R_1 S$) и от первой вершины раздвоенного зубца R до его второй вершины ($R_1 R_2$), т.е. $t_{RS} = t_{RS_2} - t_{S_1 S_2}$, с;

$$\text{КСР} = (44,5 - 100t_{RS})(t_{QR} + t_{RS}) \sqrt{\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{t_{ST-T}}{t_{QRS}}}}} - 11t_{RS} \sqrt[3]{\frac{t_{ST-T}}{t_{QRS}}}, \quad (3)$$

где t_{QRS} – время комплекса QRS , с; t_{ST-T} – время от конца зубца S до конца зубца T – при отсутствии блокад ножек пучка Гиса, а при блокаде левой ножки пучка Гиса вместо t_{ST-T} – сумма $t_{ST-T} + t_{R_1 R_2}$ и при блокаде правой ножки пучка Гиса вместо t_{ST-T} сумма $t_{ST-T} + t_{S_1 S_2}$, с;

$$\text{КСР} = 22 \left[t_{QRS} \sqrt{\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{t_{ST-T}}{t_{QRS}}}}} - 0,5t_{RS} \sqrt[3]{\frac{t_{ST-T}}{t_{QRS}}} \right], \text{ и далее вычисляют при всех указанных видах сердеч-$$

ного ритма.

Определяют ФВ:

$$\text{ФВ} = \frac{\text{КДО} - \text{КСО}}{\text{КДО}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

затем для выявления гемодинамически значимой аритмии применяется формула

$$k\sqrt{R_1 R_2} - QT > 0. \quad (5)$$

Порядок применения методов оказания экстренной кардиологической помощи в зависимости от результатов анализа ЭКС приведен на рис. 5. Как следует из анализа рис. 5, в случае, когда выражение (5) истинно, а в трех или более последующих кардиоциклах отмечается снижение ФВ, определяют наличие обширной желудочковой экстрасистолии и гемодинамически значимой аритмии (рис. 6,а). При трех и более последующих желудочковых экстрасистол наблюдается нарушение работы, приводящее к фибрилляции желудочков. Очевидно, что при этом необходимо проведение дефибрилляции.

В случае, когда выражение (5) истинно, а в трех или более последующих кардиоциклах снижения ФВ не обнаружено, то диагностируют наличие гемодинамически незначимой аритмии (рис. 6,б). При этом дефибрилляция не требуется, и согласно алгоритму, приведенному на рис. 5, проводят реваскуляризацию.

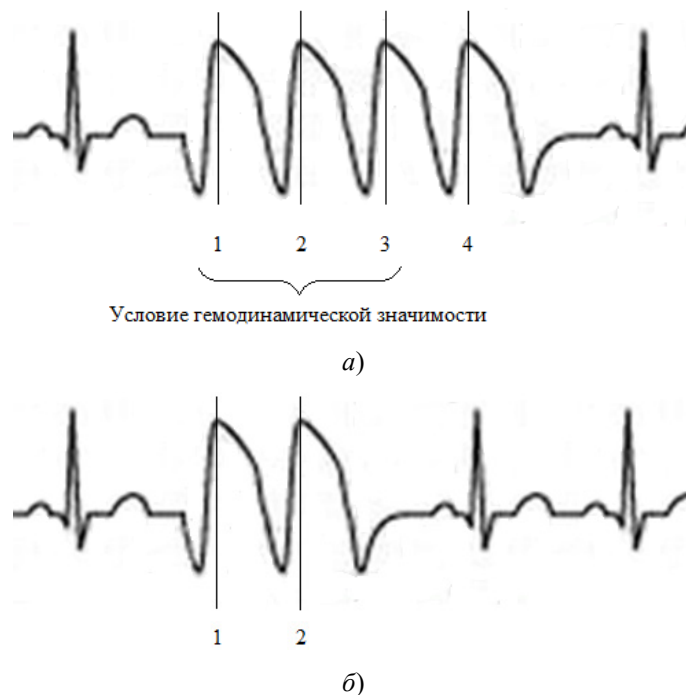


Рис. 6. Пример ЭКС: а – с гемодинамически значимой аритмией; б – гемодинамически незначимой аритмией

В случае, если выражение (5) ложно, осуществляют прогнозирование степени тяжести аритмического синдрома и при прогнозировании тяжелого аритмического синдрома проводят реваскуляризацию.

Таким образом, из вышесказанного и из анализа рис. 5 и табл. 1 следует, что проведение дефибрилляции всегда осуществляется при выявлении экстрасистол в трех и более последующих кардиоциклах. При выявлении снижения ФВ в трех и более последующих кардиоциклах и отсутствии при этом экстрасистол проводится реваскуляризация [5].

Заключение

Для решения проблем, связанных с функционированием МИС в условиях ЧС, авторами предложена МИС двойного назначения. Повышение эффективности МИС связано с важностью принятия врачебного решения в чрезвычайных ситуациях развития состояния пациента, когда ответственность за принятое решение является критической. Оптимизация работы МИС двойного назначения заключается в максимальной унификации методов и средств МИС.

Список литературы

1. Бодин О. Н., Ожикенов К. А., Ожикенова А. К. [и др.]. Концепция оказания экстренной медицинской помощи пострадавшим в чрезвычайных ситуациях // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2015. № 3. С. 143–147.

2. Патент 2085114 Российская Федерация. Устройство экстренной медицинской сортировки пострадавших / Б. Н. Варава, И. Л. Кирьяшкин, А. М. Литвинов. № 94025550/14 ; заявл. 07.07.1994 ; опубл. 27.04.1997.
3. Патент 61536 Российская Федерация. Мобильный телемедицинский комплекс / А. И. Григорьев, О. И. Орлов, В. А. Дроговоз, О. В. Переведенцев, В. М. Леванов, Ю. Г. Ревякин. № 2006137120/22 ; заявл. 20.10.2006 ; опубл. 10.03.2007.
4. Копнин А. А. Цифровые двойники в медицине // Конкурентноспособность территорий : материалы XXII Всерос. эконом. форума молодых ученых и студентов. 2019. № 3. С. 97–99.
5. Патент 2644303 Российская Федерация. Способ оказания экстренной кардиологической помощи / О. Н. Бодин, Д. А. Аржаев, А. Ю. Бодин, К. А. Ожикенов, В. Г. Полосин, А. Ф. Рахматуллов, Р. Ф. Рахматуллов, Ф. К. Рахматуллов, М. И. Сафронов, А. С. Сергеевков, А. Г. Убиенных. № 2016145352 ; заявл. 18.11.2016 ; опубл. 08.02.2018.
6. Безбородова О. Е., Крамм М. Н., Ожикенов К. А. [и др.]. Мультиагентные технологии в медицинских информационных системах : монография / под ред. проф. О. Н. Бодина. Алматы : Лантар Трейд, 2021. 314 с.
7. Патент 2694528 Российская Федерация. Способ проведения поисково – спасательных работ / В. В. Шерстнев, О. Н. Бодин, О. Е. Безбородова, Ф. К. Рахматуллов, А. И. Герасимов, К. А. Ожикенов, Н. Баянбай, Г. К. Бердибаева. № 1018139491 ; заявл. 07.11.2018 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20.
8. Махонин В. Е., Алимбаев Ч. А., Ожикенов К. А., Бодин О. Н. Портативный мобильный кардиоанализатор для дистанционного мониторинга экг // Аллея Науки. 2020. № 5.

References

1. Bodin O.N., Ozhikenov K.A., Ozhikenova A.K. et.al. The concept of providing emergency medical care to victims in emergency situations. *Vestnik Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2015;(3):143–147. (In Russ.)
2. Patent 2085114 Russian Federation. *Ustroystvo ekstrennoy meditsinskoy sortirovki postradavshikh = The device of emergency medical triage of the deceased*. B.N. Varava, I.L. Kir'yashkin, A.M. Litvinov. № 94025550/14; appl. 07.07.1994; publ. 27.04.1997. (In Russ.)
3. Patent 61536 Russian Federation. *Mobil'nyy telemeditsinskiy kompleks = Mobile telemedicine complex*. A.I. Grigor'ev, O.I. Orlov, V.A. Drogovoz, O.V. Perevedentsev, V.M. Levanov, Yu.G. Revyakin. № 2006137120/22; appl. 20.10.2006; publ. 10.03.2007. (In Russ.)
4. Koptin A.A. Digital doubles in medicine. *Konkurentnosposobnost' territoriy: materialy XXII Vseros. ekonom. foruma molodykh uchennykh i studentov = Competitiveness of territories : materials of XXII Vseros. economy. forum of young scientists and students*. 2019;(3):97–99. (In Russ.)
5. Patent 2644303 Russian Federation. *Sposob okazaniya ekstrennoy kardiologicheskoy pomoshchi = Method of rendering emergency cardiological care*. O.N. Bodin, D.A. Arzhaev, A.Yu. Bodin, K.A. Ozhikenov, V.G. Polosin, A.F. Rakhmatullof, R.F. Rakhmatullof, F.K. Rakhmatullof, M.I.Safronov, A.S. Sergeenkov, A.G. Ubiennykh. № 2016145352; appl. 18.11.2016; publ. 08.02.2018. (In Russ.)
6. Bezborodova O.E., Kramm M.N., Ozhikenov K.A. et al. *Mul'tiagentnye tekhnologii v meditsinskikh informatsionnykh sistemakh: monografiya = Multi-agent technologies in medical information systems : monograph*. Almaty: Lantar Treyd, 2021:314. (In Russ.)
7. Patent 2694528 Russian Federation. *Sposob provedeniya poiskovo – spasatel'nykh rabot = Method of search and rescue operations*. V.V. Sherstnev, O.N. Bodin, O.E. Bezborodova, F.K. Rakhmatullof, A.I. Gerasimov, K.A. Ozhikenov, N. Bayanbay, G.K. Berdibaeva. № 1018139491; appl. 07.11.2018; publ. 16.07.2019, Bull. № 20. (In Russ.)
8. Makhonin V.E., Alimbaev Ch.A., Ozhikenov K.A., Bodin O.N. Portable mobile cardioanalyzer for remote ecg monitoring. *Alleya Nauki = Alley of Science*. 2020;(5). (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Николаевич Бодин

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

Oleg N. Bodin

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

Михаил Вячеславович Едемский
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: misha.f.2015@mail.ru

Mikhail V. Edemskiy
Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Наталья Эдуардовна Кручинина
аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kruchininane@gmail.com

Natalia E. Kruchinina
Postgraduate student,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,
Penza, Russia)

Наталья Александровна Сержантова
кандидат технических наук,
доцент кафедры биомедицинской инженерии,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: itmmbpsgta@yandex.ru

Natalia A. Serzhantova
Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of biomedical engineering,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina 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 25.05.2022

УДК 543.08
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-15

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ МЕДИЦИНСКАЯ СИСТЕМА УДАЛЕННОЙ КОРРЕКЦИИ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ПОСТРАДАВШЕГО В ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

В. В. Шерстнев

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность работы обусловлена проведением медицинской сортировки пострадавших в чрезвычайных ситуациях, оказанием им медицинской помощи непосредственно в зоне чрезвычайной ситуации, их медицинской эвакуацией в условиях дефицита времени, сопровождающего проведение спасательных работ, а также рисками, которым подвергаются спасатели и врачи при спасении пострадавших. Целью работы является разработка информационно-управляющей медицинской системы удаленной коррекции состояния здоровья пострадавшего в чрезвычайных ситуациях. *Материалы и методы.* Представлен подход к построению информационно-управляющей медицинской системы удаленной коррекции состояния здоровья пострадавших в чрезвычайных ситуациях. *Результаты.* Представлена схема построения и приведены основные элементы предлагаемой информационно-управляющей медицинской системы. Представлены назначение и функционал входящих в систему беспилотных воздушных судов. Описан подход к заблаговременной подготовке лечебных учреждений к размещению и оказанию медицинской помощи доставляемым к ним пострадавшим за счет информационного обмена со службой оптимизации лечебно-диагностической медицинской помощи под управлением сервера предложенной системы. *Выводы.* Применение предложенной информационно-управляющей медицинской системы удаленной коррекции состояния здоровья пострадавших в условиях чрезвычайных ситуаций позволяет сократить время, отводимое на оказание медицинской помощи и эвакуацию пострадавших, а также выполнить данные мероприятия с минимальным задействованием в зоне проведения спасательных работ врачей и спасателей.

Ключевые слова: медицинская система, удаленная коррекция состояния здоровья, пострадавший, чрезвычайная ситуация, медицинская помощь, эвакуация, беспилотное воздушное судно, манипулятор

Для цитирования: Шерстнев В. В. Информационно-управляющая медицинская система удаленной коррекции состояния здоровья пострадавшего в чрезвычайной ситуации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 119–127. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-15

INFORMATION AND CONTROL MEDICAL SYSTEM FOR REMOTE CORRECTION OF THE HEALTH STATUS OF THE VICTIM IN AN EMERGENCY SITUATION

V.V. Sherstnev

Penza State University, Penza, Russia
iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the work is due to the medical sorting of victims in emergency situations, providing them with medical assistance directly in the emergency zone, their medical evacuation in conditions of time shortage accompanying rescue operations, as well as the risks that rescuers and doctors are exposed to when rescuing victims. The aim of the work is to develop an information management medical system for remote correction of the health status of the victim in emergency situations. *Materials and methods.* An approach to the construction of an information management medical system for remote correction of the health status of victims in emergency situations is presented. *Results.* The scheme of construction is presented and the main elements of the proposed information management medical system are presented. The purpose and functionality of the unmanned aircraft included in the system are presented. An approach is described to the advance preparation of medical institutions for the placement and provision of medical care to the victims delivered to them through information exchange with the service for optimizing therapeutic and diagnostic medical care under the control of the server of the proposed system. *Conclusions.* The use of the pro-

posed information and control medical system for remote correction of the health status of victims in emergency situations allows to reduce the time allotted for the provision of medical care and evacuation of victims, as well as to carry out these measures with minimal involvement of doctors and rescuers in the area of rescue operations.

Keywords: medical system, remote health correction, victim, emergency, medical assistance, evacuation, unmanned aircraft, manipulator

For citation: Sherstnev V.V. Information and control medical system for remote correction of the health status of the victim in an emergency situation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):119–127. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-15

Постановка проблемы

Первоочередными задачами при проведении спасательных работ в зоне чрезвычайной ситуации (ЧС) являются поиск пострадавших, их деблокирование (обеспечение доступа к ним спасателей), оказание медицинской помощи и эвакуация [1]. Крайне важным фактором при этом является дефицит времени: в медицине катастроф используется понятие «золотого часа» – промежутка времени длительностью около 60 мин, в течение которого оказание помощи пострадавшему является наиболее эффективным [2, 3].

Кроме того, жизни спасателей также подвержены рискам, заключающимся, прежде всего, в воздействии поражающих факторов источников ЧС, агрессивной окружающей среды, внезапности и дефиците времени, а также в недостаточности информационного обеспечения.

Таким образом, актуальным научно-техническим направлением являются исследования, направленные на сокращение времени ожидания пострадавшими медицинской помощи и эвакуации в ходе проведения спасательных работ, а также на минимизацию количества задействованных в зоне ЧС спасателей и врачей за счет разработки решений, позволяющих удаленно решать вышеупомянутые задачи.

Построение и основные элементы информационно-управляющей медицинской системы удаленной коррекции состояния здоровья

Автором разработан способ проведения спасательных работ [4], заключающийся в применении беспилотных воздушных судов (БВС) вертикальных взлета и посадки различного назначения и функционала, объединенных в гетерогенную группу и позволяющих обеспечить проведение основных мероприятий по спасению и оказанию медицинской помощи пострадавшим.

Главными преимуществами использования данной беспилотной воздушной техники являются:

- меньшее время следования к месту проведения работ по сравнению с наземной техникой, отсутствие зависимости от наличия препятствий на путях сообщения;
- малые размеры по сравнению с пилотируемыми транспортными средствами, в том числе вертолетами, чем обеспечивается их высокая маневренность, а также возможность приближаться непосредственно к месту проведения работ;
- наличие возможности проведения мероприятий спасательных работ без непосредственного присутствия спасателей и врачей.

Качественный и количественный состав гетерогенной группы может варьироваться в зависимости от характера ЧС. Так, группа может включать следующие БВС:

- БВС координационного назначения, осуществляющие развертывание подсистемы навигации в условиях ЧС путем размещения навигационных маяков [5], разметку путей эвакуации сигнальными фонарями или свечами;
- БВС поискового назначения, оснащенные видеокамерами, позволяющими осуществлять съемку, в том числе в условиях недостаточной видимости, тепловизором, а также широкополосным радаром, обеспечивающим обнаружение пострадавших под завалами и получение информации о ряде показателей их жизненно важных функций, на основании которых осуществляется медицинская сортировка;
- БВС эвакуационного назначения [6], оснащенные капсулой реанимации, обеспечивающей мониторинг показателей и коррекцию жизненно важных функций пострадавшего в ходе его эвакуации, в том числе проведение сердечно-легочной реанимации;

– БВС медицинского назначения, оснащенные манипулятором и набором средств медицинского назначения [7], позволяющими врачу удаленно корректировать состояние здоровья пострадавшего, ожидающего своей эвакуации;

– БВС экологического назначения, оснащенные манипулятором и набором средств минимизации опасных факторов источников ЧС.

БВС поискового, эвакуационного и медицинского назначений, а также автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов-врачей, осуществляющих управление оборудованием данных судов, являются составными компонентами информационно-управляющей медицинской системы удаленной коррекции состояния здоровья пострадавшего, схема которой приведена на рис. 1.

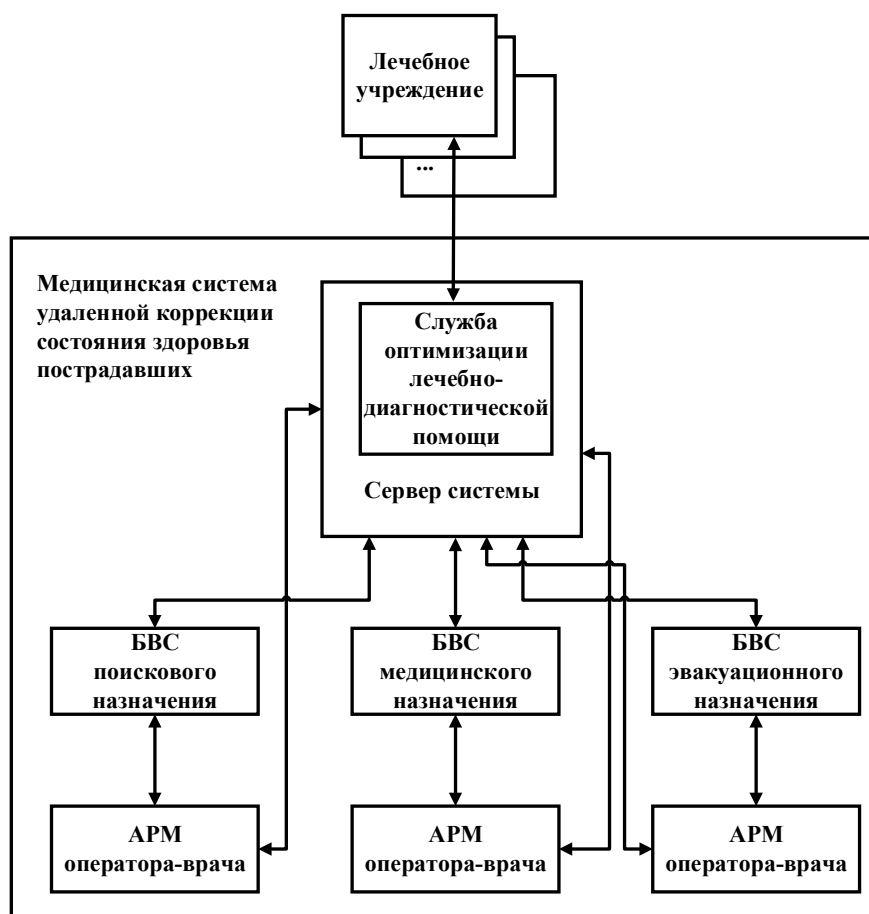


Рис. 1. Схема построения медицинской системы удаленной коррекции состояния здоровья пострадавшего в условиях ЧС

Алгоритм работы БВС поискового назначения включает следующие шаги.

Шаг 1. Обнаружение пострадавшего.

В ходе проведения спасательных работ БВС поискового назначения осуществляет облет зоны ЧС на предмет поиска пострадавших. Для обнаружения используется набор видеокамер, которые предназначены в том числе для ведения съемки в условиях недостаточной видимости (за счет наличия инфракрасной подсветки), источник направленного света (фонарь-прожектор). Тепловизор, которым также оснащается судно, позволяет обнаруживать человека в полном отсутствии освещенности, в дыму, среди листвы; кроме того, сквозь туман в некоторых случаях объекты видны через тепловизор лучше, чем через камеры видимого оптического диапазона [8].

Сверхширокополосный радар, которым также оснащается данное БВС, обнаруживает человека по его движению, в том числе за оптически непрозрачными преградами. Для обнаружения достаточно дыхательных движений грудной клетки [9], что позволяет использовать

данное оборудование и для поиска людей, находящихся без сознания или утративших способность двигаться.

Шаг 2. Оценка функционального состояния организма пострадавшего.

При обнаружении пострадавшего оператор осуществляет вблизи него посадку БВС и направляет на него сверхширокополосный радар. Радар помимо выявления дыхательных движений человека позволяет обнаружить его сердцебиение [10]. Информация о частоте дыхания и частоте сердечных сокращений передается оператору-врачу для проведения медицинской сортировки.

БВС поискового назначения также оснащен микрофоном и системой громкоговорящей связи, обеспечивающими контакт оператора-врача с пострадавшим, получение пострадавшим каких-либо инструкций, указаний. Так, например, оператор-врач может дать команду всем пострадавшим, способным к самостоятельному передвижению, сгруппироваться и отойти в сторону (данный прием используется спасателями как один из шагов проведения медицинской сортировки).

Шаг 3. Проведение медицинской сортировки.

Для проведения медицинской сортировки используется алгоритм, основанный на методе медицинской сортировки Sieve [4] и использующий информацию о способности человека к самостоятельному передвижению, частоте его дыхания и пульса (рис. 2).

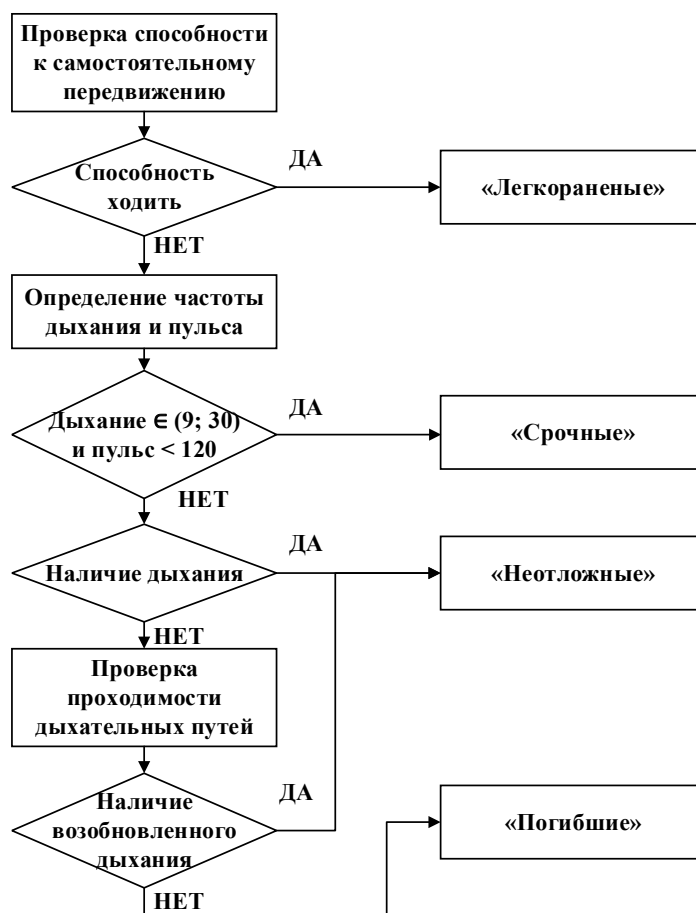


Рис. 2. Алгоритм медицинской сортировки

На основании проведенной сортировки пострадавший соотносится с одной из следующих групп: «легкораненые», «срочные», «неотложные», «погибшие».

Далее БВС эвакуационного назначения получают команду на эвакуацию пострадавших согласно следующей очередности: «неотложные» – «срочные» – «легкораненые». В ЧС с большими количествами пострадавших и, соответственно, в условиях возникающего дефицита судов эвакуационного назначения часть пострадавших остается ждать своей эвакуации до

тех пор, пока данные БВС не освободятся; при этом им оказывается помощь посредством судов медицинского назначения.

БВС эвакуационного назначения несет на своем борту капсулу реанимации, где размещается пострадавший сам либо с посторонней помощью. Оборудование капсулы содержит средства мониторинга жизненно важных функций – электрокардиограф, тонометр, пульсоксиметр, капнограф, термометр. Информация от данных средств поступает на АРМ оператора-врача, который непрерывно отслеживает состояние эвакуируемого пострадавшего.

При размещении пострадавшего в капсуле к нему может быть подключено реанимационное оборудование: устройство для проведения компрессий грудной клетки, дефибриллятор, аппарат искусственной вентиляции легких, устройство для ввода инъекций.

БВС эвакуационного назначения, кроме того, содержит систему управления микроклиматом, обеспечивающую оптимальный температурно-влажностный режим внутри капсулы и фильтрацию воздуха, поступающего из внешней среды в капсулу либо рециркуляцию воздуха внутри капсулы с полной изоляцией от внешней среды (в случае загрязнения зоны ЧС опасными веществами). Система управления микроклиматом содержит датчики температуры и опасных веществ, размещенные внутри и снаружи капсулы и обеспечивающие анализ воздуха в данных средах, отопитель, кондиционер, устройства фильтрации воздуха.

Оборудование капсулы реанимации позволяет незамедлительно выявлять внезапную остановку кровообращения пострадавшего и проводить соответствующие данному жизнеугрожающему состоянию реанимационные мероприятия [6].

Так, при асистолии и электромеханической диссоциации сердца осуществляются компрессии грудной клетки с подачей дыхательной смеси аппаратом искусственной вентиляции легких, а также при необходимости вводятся некоторые медицинские препараты, например, адреналин, атропин [11].

При выявлении нарушений ритма, требующих применения дефибриллятора (фибрилляции желудочков, желудочковой тахикардии с широкими комплексами [12]), помимо компрессий грудной клетки с подачей дыхательной смеси наносится электрический разряд. При необходимости также осуществляется введение медицинских препаратов, например, лидокаина [11].

Отличительной чертой БВС медицинского назначения являются набор медицинских средств, которыми комплектуются ячейки съемной кассеты, размещаемой на борту судна, и манипулятор, к рабочему концу (схвату) которого подсоединяется соответствующее средство перед проведением той или иной операции по оказанию медицинской помощи [7].

Внешний вид манипулятора представлен на рис. 3. Особенностью манипулятора является его конструкция – наличие двух телескопических звеньев, благодаря чему обеспечивается компактное его складывание в грузовом отсеке БВС перед полетом и прирост рабочей зоны манипулятора при оказании медицинской помощи пострадавшему.



Рис. 3. Внешний вид манипулятора, устанавливаемого на БВС

Манипулятор обладает девятью степенями свободы, что представляет собой избыточное их количество (т.е. больше шести): это способствует эффективному огибанию препятствий (в том числе опор шасси БВС) в ходе его конфигурирования, а также обеспечивает доступ к тому или иному участку тела пострадавшего.

БВС медицинского назначения посредством манипулятора и подсоединяемых к его схвату средств оказывает следующие виды медицинской помощи:

– Проведение инъекций пострадавшему. Для этого используется подсоединяемое к манипулятору устройство [7], представляющее собой барабан, камеры которого содержат шприцы с медицинскими препаратами, установленный на вращающейся его платформе; путем вращения барабана необходимый шприц устанавливается напротив инъекционного отверстия, после чего осуществляется введение препарата пострадавшему.

– Подача пострадавшему воды и пероральных препаратов, для чего БВС комплектуется содержащими их емкостями. Пероральные медицинские препараты содержатся в разбавленной водой и готовом к приему виде.

– Размещение портативного регистратора электрокардиосигналов на теле пострадавшего. Данное устройство [13] непрерывно представляет оператору-врачу информацию о сердечной деятельности человека, чем обеспечивается своевременное выявление его жизнеугрожающего состояния.

– Освобождение участков тела пострадавшего от одежды, от запутывания в одежде, проволоке. Для этого используются подсоединяемый к манипулятору инструмент, содержащий лезвия медицинских тупоконечных ножниц. Данная операция позволяет подготовить пострадавшего к размещению на его теле портативного регистратора электрокардиосигналов.

– Остановка кровотечения, как внутреннего, так и внешнего. Для этого к схвату манипулятора подсоединяется картридж с быстросохнущей кровоостанавливающей пеной [14, 15] и устройство для ее нанесения на рану пострадавшего или введения внутрь его тела (в случае наличия внутренних кровотечений).

Кассета БВС также комплектуется захватом зажимного типа, подсоединяемым к манипулятору и позволяющим перемещать при необходимости те или иные предметы.

БВС медицинского назначения также маркирует краской пострадавших согласно результатам медицинской сортировки. Для этого к манипулятору подсоединяется устройство для нанесения краски на тело или одежду пострадавшего, содержащее картриджи с красками, цвета которых соответствуют тем или иным группам медицинской сортировки (черная – «погибшие», красная – «неотложные», желтая – «срочные», зеленая – «легкораненые»).

Вышеперечисленное оборудование при необходимости может отсоединяться от манипулятора (после снятия блокировки оператором-врачом) и применяться вручную для оказания медицинской помощи пострадавшему.

Вся информация о состоянии пострадавших, собираемая в ходе мониторинга показателей их жизненно важных функций и оказания им медицинской помощи, обобщается службой оптимизации лечебно-диагностической медицинской помощи [16] на сервере медицинской системы удаленной коррекции состояния здоровья и направляется в лечебные учреждения (см. рис. 1), чем обеспечивается их заблаговременная подготовка к приему пострадавших.

Заключение

Автором предложена информационно-управляющая медицинская система удаленной коррекции состояния здоровья пострадавшего в ЧС, включающая БВС поискового, эвакуационного и медицинского назначения с установленным на них оборудованием, автоматизированные рабочие места операторов-врачей, а также сервер, осуществляющий посредством службы оптимизации лечебно-диагностической помощи информационный обмен с лечебными учреждениями, принимающими пострадавших.

Применение данной системы при проведении спасательных работ сокращает время ожидания пострадавшими оказания медицинской помощи и эвакуации, а также способствует минимизации количества привлекаемых к проведению работ непосредственно в зоне ЧС спасателей и врачей.

Список литературы

1. Гражданская защита : энциклопедический словарь / под общ. ред. В. А. Пучкова. 3-е изд., перераб. и доп. М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. 664 с.
2. Правило «Золотого часа». URL: <https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/4147904?ysclid=lan8tkbeg058415379> (дата обращения: 21.11.2022).
3. Козиев М. П., Горбачева С. М. Обоснование концепции «золотого часа» при острой кровопотере // Сибирский медицинский журнал. 2011. № 6. С. 108–110.
4. Патент 2694528 С1 Российская Федерация. Способ проведения поисково-спасательных работ / Шерстнев В. В., Бодин О. Н., Безбородова О. Е., Рахматуллин Ф. К., Герасимов А. И. ; заявитель и правообладатель ООО «Кардиовид», г. Пенза. № 2018139491 ; заявл. 07.11.2018 ; опубл. 16.07.2019, Бюл. № 20.
5. Патент 2756032 С1 Российская Федерация. Способ и система навигации объектов в зоне чрезвычайной ситуации / Шерстнев В. В., Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Светлов А. В. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза. № 2020114909 ; заявл. 11.11.2020 ; опубл. 24.09.2021, Бюл. № 27.
6. Патент 2775688 С1 Российская Федерация. Способ оказания экстренной кардиологической помощи и система для осуществления способа / Шерстнев В. В., Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Баранов В. А., Рахматуллин Ф. К., Рахматуллин Р. Ф. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза. № 2020143871 ; заявл. 30.12.2020 ; опубл. 06.07.2022, Бюл. № 19.
7. Патент 2762052 С1 Российская Федерация. Способ проведения спасательных работ и беспилотное воздушное судно для осуществления способа / Шерстнев В. В., Безбородова О. Е., Белик Д. С., Бодин О. Н., Спиркин А. Н., Бердибаева Г. К. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза. № 2020143872 ; заявл. 30.12.2020 ; опубл. 15.12.2021, Бюл. № 35. С. 23.
8. Стены, металл, деревья или через что еще могут «видеть» тепловизоры? (flir.pro). URL: <https://www.flir.pro/articles/steny-metall-derevja-ili-cherez-cto-eshe-mogut-videt-teplovizory/> (дата обращения: 21.11.2022).
9. Ильясов Ф. Ш. Радары для обнаружения людей за оптически непрозрачными преградами // Технологии гражданской безопасности. 2009. Т. 7, № 3-4. С. 86–90.
10. Иммореев И. Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 1. С. 5–31.
11. Руководство по кардиологии : учеб. пособие : в 3 т. / под ред. Г. И. Сторожалова, А. А. Горбаченкова. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2008. Т. 1. 672 с.
12. Мороз В. В., Бобринская И. Г., Васильев В. Ю. [и др.]. Сердечно-легочная реанимация. М. : ФНКЦ РР, МГМСУ, НИИОР, 2017. 60 с.
13. Патент 2540528 С1 Российская Федерация. Устройство для регистрации электрокардиосигналов в условиях свободной двигательной активности / Бодин О. Н., Кривоногов Л. Ю., Рахматуллин Ф. К., Петровский М. А., Иванчуков А. Г., Бальзанникова Е. А., Папшев Д. В. ; заявитель и правообладатель Общество с ограниченной ответственностью (ООО) «Кардиовид», г. Пенза. № 2013132637/14 ; заявл. 16.07.2013 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4.
14. Разработана пена для остановки внутренних кровотечений (msiter.ru). URL: <https://msiter.ru/news/razrabotana-pena-dlya-ostanovki-vnutrennih-krovotecheniy?ysclid=laq0cs4361248734143> (дата обращения: 21.11.2022).
15. Патент 2607321 С2 Российская Федерация. Способ остановки внутреннего полостного кровотечения, саморасширяющаяся полиуретановая пена и устройство для осуществления способа / Литинский М. А. ; заявитель и правообладатель Литинский Михаил Александрович. № 2015111352 ; заявл. 30.03.2015 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.
16. Патент 2750057 С1 Российская Федерация. Способ и система оптимизации лечебно-диагностической медицинской помощи / Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Герасимов А. И., Крамм М. Н., Убиенных А. Г., Шерстнев В. В. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза. № 2020121332 ; заявл. 26.06.2020 ; опубл. 21.06.2021, Бюл. № 18.

References

1. Puchkova V.A. (ed.). *Grazhdanskaya zashchita: entsiklopedicheskiy slovar'. 3-e izd., pererab. i dop. = Civil Protection: an encyclopedic dictionary. 3rd ed., rev. and suppl.* Moscow: FGBU VNI GOChS (FTs), 2015:664. (In Russ.)

2. *Pravilo «Zolotogo chasa» = The Golden Hour rule.* (In Russ.). Available at: <https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/4147904?ysclid=lan8tkbeg058415379> (accessed 21.11.2022).
3. Koziev M.P., Gorbacheva S.M. Substantiation of the concept of "golden hour" in acute blood loss. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal = Siberian Medical Journal.* 2011;(6):108–110. (In Russ.)
4. Patent 2694528 S1 Russian Federation. *Sposob provedeniya poiskovo-spasatel'nykh robot = Method of search and rescue operations.* Sherstnev V.V., Bodin O.N., Bezborodova O.E., Rakhmatullov F.K., Gerasimov A.I.; applicant and patent holder ООО «Kardiovid», g. Penza. № 2018139491; appl. 07.11.2018; publ. 16.07.2019, Bull. № 20. (In Russ.)
5. Patent 2756032 S1 Russian Federation. *Sposob i sistema navigatsii ob"ektov v zone chrezvychaynoy situatsii = Method and system of navigation of objects in the emergency situation zone.* Sherstnev V.V., Bezborodova O.E., Bodin O.N., Svetlov A.V.; applicant and patent holder Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Penzenskiy gosudarstvennyy universitet», g. Penza. № 2020114909; appl. 11.11.2020; publ. 24.09.2021, Bull. № 27. (In Russ.)
6. Patent 2775688 S1 Russian Federation. *Sposob okazaniya ekstrennoy kardiologicheskoy pomoshchi i sistema dlya osushchestvleniya sposoba = Method of providing emergency cardiological care and a system for implementing the method.* Sherstnev V.V., Bezborodova O.E., Bodin O.N., Bodin A.Yu., Baranov V.A., Rakhmatullov F.K., Rakhmatullov R.F.; applicant and patent holder Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Penzenskiy gosudarstvennyy universitet», g. Penza. № 2020143871; appl. 30.12.2020; publ. 06.07.2022, Bull. № 19. (In Russ.)
7. Patent 2762052 S1 Russian Federation. *Sposob provedeniya spasatel'nykh robot i bespilotnoe vozdušnoe sudno dlya osushchestvleniya sposoba = Method of rescue operations and unmanned aircraft for the implementation of the method.* Sherstnev V.V., Bezborodova O.E., Belik D.S., Bodin O.N., Spirkin A.N., Berdibaeva G.K.; applicant and patent holder Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Penzenskiy gosudarstvennyy universitet», g. Penza. № 2020143872; appl. 30.12.2020; publ. 15.12.2021, Bull. № 35. S. 23. (In Russ.)
8. *Steny, metall, derev'ya ili cherez chto eshche mogut «videt'» teplovizory? (flir.pro) = Walls, metal, trees, or through what else can thermal imagers "see"? (flir.pro).* (In Russ.). Available at: <https://www.flir.pro/articles/steny-metall-derevja-ili-cherez-chto-eshe-mogut-videt-teplovizory/> (accessed 21.11.2022).
9. Il'yasov F.Sh. Radars for detecting people behind optically opaque barriers. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti = Technologies of civil security.* 2009;7(3-4):86–90. (In Russ.)
10. Immoreev I.Ya. Ultra-wideband radars. Features and capabilities. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and electronics.* 2009;54(1):5–31. (In Russ.)
11. Storozhalov G.I., Gorbachenkov A.A. *Rukovodstvo po kardiologii: ucheb. posobie: v 3 t. = Manual of Cardiology: textbook: in 3 vol.* Moscow: GEOTAR-Media, 2008;1:672. (In Russ.)
12. Moroz V.V., Bobrinskaya I.G., Vasil'ev V.Yu. et al. *Serdechno-legochnaya reanimatsiya = Cardiopulmonary resuscitation.* Moscow: FNKTs RR, MGMSU, NIIOR, 2017:60. (In Russ.)
13. Patent 2540528 S1 Russian Federation. *Ustroystvo dlya registratsii elektrokardiosignalov v usloviyakh svobodnoy dvigatel'noy aktivnosti = Device for recording electrocardiosignals in conditions of free motor activity.* Bodin O.N., Krivonogov L.Yu., Rakhmatullov F.K., Petrovskiy M.A., Ivanchukov A.G., Bal'zannikova E.A., Papshev D.V.; applicant and patent holder Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu (ООО) «Kardiovid», g. Penza. № 2013132637/14; appl. 16.07.2013; publ. 10.02.2015, Bull. № 4. (In Russ.)
14. *Razrabotana pena dlya ostanovki vnutrennikh krovotecheniy (msiter.ru) = Developed foam to stop internal bleeding (msiter.ru).* (In Russ.). Available at: <https://msiter.ru/news/razrabotana-pena-dlya-ostanovki-vnutrennikh-krovotecheniy?ysclid=laq0cs4361248734143> (accessed 21.11.2022).
15. Patent 2607321 S2 Russian Federation. *Sposob ostanovki vnutrennego polostnogo krovotecheniya, samorasshiryayushchayasya poliuretanovaya pena i ustroystvo dlya osushchestvleniya sposoba = Method of stopping internal abdominal bleeding, self-expanding polyurethane foam and a device for implementing the method.* Litinskiy M.A.; applicant and patent holder Litinskiy Mikhail Aleksandrovich. № 2015111352; appl. 30.03.2015; publ. 10.01.2017, Bull. № 1. (In Russ.)
16. Patent 2750057 S1 Russian Federation. *Sposob i sistema optimizatsii lechebno-diagnosticskoy meditsinskoy pomoshchi = Method and system of optimization of therapeutic and diagnostic medical care.* Bezborodova O.E., Bodin O.N., Gerasimov A.I., Kramm M.N., Ubiennykh A.G., Sherstnev V.V.; applicant and patent holder Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Penzenskiy gosudarstvennyy universitet», g. Penza. № 2020121332; appl. 26.06.2020; publ. 21.06.2021, Bull. № 18. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Вадимович Шерстнев

соискатель,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Vladislav V. Sherstnev

Applicant,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 22.04.2022

Поступила после рецензирования/Revised 24.05.2022

Принята к публикации/Accepted 27.06.2022

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

CONTROL AND TESTING AIRCRAFT AND THEIR SYSTEMS

УДК 629.7.017

doi:10.21685/2307-5538-2022-4-16

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕСТОВ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ АВТОНОМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ СИТУАЦИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПОДСИСТЕМ

А. И. Лоскутов¹, А. Н. Шиян², В. А. Клыков³, С. А. Неупокоев⁴

^{1,2,3,4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

^{1,2} vka@mil.ru, ³ v.klikoff86@mail.ru, ⁴ stas.neupokoev.99@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена возможность синтеза последовательностей управляющих воздействий для определения вида технического состояния бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов при тестовом контроле на этапе применения по назначению. *Материалы и методы.* Решение задачи осуществляется в рамках рассматриваемой математической модели функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры. С целью сокращения времени отработки тестов, так как затраты времени связаны с затратами других ресурсов автономных космических аппаратов, осуществляется нахождение кратчайших путей между исходными и целевыми состояниями бортовой радиоэлектронной аппаратуры в условиях ситуационного взаимодействия подсистем, режимов работы. Основное внимание уделено разработке алгоритма синтеза оптимальных тестов в зависимости от количественных характеристик модели. Задача сведена к задаче китайского почтальона. *Результаты и выводы.* Проведен анализ вычислительной сложности алгоритмов нахождения кратчайших путей при решении задачи китайского почтальона на основе заданной декомпозированной конечно-автоматной модели бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: бортовая система контроля, техническое состояние, кратчайший путь, оптимизация, задача китайского почтальона

Для цитирования: Лоскутов А. И., Шиян А. Н., Клыков В. А., Неупокоев С. А. Алгоритм синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры автономных космических аппаратов на основе ситуационных взаимодействий подсистем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 128–138. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-16

ALGORITHM FOR SYNTHESIS OF OPTIMAL TESTS OF ONBOARD RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT OF AUTONOMOUS SPACE VEHICLES BASED ON SITUATIONAL INTERACTIONS OF SUBSYSTEMS

A.I. Loskutov¹, A.N. Shiyann², V.A. Klykov³, S.A. Neupokoev⁴

^{1,2,3,4} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Peterburg, Russia

^{1,2} vka@mil.ru, ³ v.klikoff86@mail.ru, ⁴ stas.neupokoev.99@mail.ru

Abstract. *Background.* The possibility of synthesis of sequences of control actions for determining the type of technical condition of onboard equipment of autonomous space vehicles during test control at the stage of intended use is

considered. *Materials and methods.* The solution of the problem is carried out within the framework of the considered mathematical model of the functioning of on-board radio-electronic equipment. In order to reduce the test processing time, since the time costs are associated with the costs of other autonomous space vehicles resources, the shortest paths between the initial and target states of the on-board radio-electronic equipment are found under conditions of situational interaction of subsystems and operating modes. The main attention is paid to the development of an algorithm for the synthesis of optimal tests, depending on the quantitative characteristics of the model. The problem is reduced to the problem of the Chinese postman. *Results and conclusions.* An analysis of the computational complexity of algorithms for finding the shortest paths in solving the problem of the Chinese postman based on a given decomposed finite-automaton model of on-board radio-electronic equipment is carried out.

Keywords: onboard control system, technical condition, shortest way, optimization, problem of the Chinese postman

For citation: Loskutov A.I., Shiyan A.N., Klykov V.A., Neupokoev S.A. Algorithm for synthesis of optimal tests of onboard radio electronic equipment of autonomous space vehicles based on situational interactions of subsystems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):128–138. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-16

Введение

Одной из приоритетных задач при создании ракетно-космической техники нового поколения является задача поддержания и продления жизненного цикла космических аппаратов. Основным подходом для решения поставленной задачи является перенос функции принятия решения о виде технического состояния аппаратуры на «борт» космических аппаратов. Для этого создаются и широко используются бортовые системы контроля космических аппаратов, которые способствуют повышению их надежности в целом¹. Однако, как показал анализ [1, 2], существующие подходы при реализации концепции бортового контроля не отвечают в полной мере требованиям к отказоустойчивости. Из этого можно сделать вывод, что вопросы определения нештатных ситуаций в различных ситуациях (режимах) и их парирования на данный момент весьма актуальны. Особенно остро данные вопросы стоят в условиях функционирования автономных космических аппаратов (АКА), когда эффективное решение диагностических задач позволяет своевременно выполнять реконфигурацию бортовой аппаратуры и поставленные целевые задачи.

Постановка задачи разработки алгоритма синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры автономных космических аппаратов на основе представленных ситуационных взаимодействий подсистем графовыми моделями

Разработке алгоритма синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) космического аппарата с высоким уровнем автономности должно предшествовать формализованное представление предметной области в рамках заданных ограничений. Не определяя на данном этапе точно математический инструмент для формализации процесса функционирования БРЭА, сформулируем математическую постановку задачи разработки алгоритма синтеза оптимальных тестов в общем виде.

Дано:

1. Модель функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры M_Φ автономных космических аппаратов. В общем виде, без уточнения инструмента к формализации, M_Φ может быть представлена следующим образом:

$$M_\Phi = \langle \Omega, \tau \rangle, \quad (1)$$

где Ω – множество параметров математической модели БРЭА, характеризующее размерность M_Φ бортовой аппаратуры; τ – правила, характеризующие отношения на множестве Ω , которые определяют структуру модели M_Φ в целом.

2. Множество команд управления БРЭА КА $x = \{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$, $x \in X_b$.

3. Время выполнение команд управления БРЭА КА t_j , $j = \overline{1, m}$, $t_j \in T$.

¹ ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 1991-01-01.

Необходимо отметить, что множества U_b и T включены в множество Ω ($X_b \subset \Omega$, $T \subset \Omega$).

4. Множество алгоритмов Ω_A для определения вида технического состояния БРЭА АКА в рамках заданной математической модели.

Требуется разработать алгоритм контроля A БРЭА с целью минимизации времени определения вида технического состояния на основе тестов. С формальной точки зрения данная постановка задачи может быть представлена следующим образом:

$$T_k(A(M_\phi, X_b)) \xrightarrow{A \in \Omega_A} \min. \quad (2)$$

С точки зрения решения задачи тестового контроля, а также для объективного отражения причинно-следственных связей, происходящих в бортовой аппаратуре АКА, в различных ситуациях (режимах) удобно рассматривать модели, которые могут быть представлены в виде графовой структуры. Обозначим такой способ формализованного представления функционирования БРЭА АКА как графовые модели (ГМ) [3]. Применение ГМ для описания процессов функционирования бортовой аппаратуры позволяет использовать известные математические методы [4] для построения тестовых последовательностей минимальной длины для решения поставленной задачи (2).

В общем случае графовые модели определяют зависимости, которые лежат между абстрактными элементами модели рассматриваемой системы с возможным представлением в виде графовой структуры [4]. В своей простейшей форме модель определяет напрямую взаимосвязь переменных. ГМ трактуют рассматриваемые системы ориентированным графом, где вершины представляют состояния, а помеченные дуги – связи между ними. Такое представление отношений является наиболее распространенным и отражает иерархическое и сетевое взаимодействие между элементами модели. Вместе с тем данный подход при формальном представлении процесса функционирования бортовой аппаратуры почти всегда сопряжен с проблемой размерности создаваемых математических конструкций (моделей) [5]. Это, прежде всего, обусловлено требуемым уровнем детализации причинно-следственных связей взаимодействия подсистем в БРЭА при решении задачи тестового контроля. Выходом из сложившейся ситуации является логическая декомпозиция формального представления процессов функционирования БРЭА АКА.

Задача тестового контроля при графовом представлении рассматриваемого объекта может быть интерпретирована как обход всех дуг (вершин) ГМ, характеризующих ситуационное взаимодействие (или режимов) подсистем БРЭА АКА. Данная интерпретация позволяет перейти к поиску оптимальных по критерию минимума суммарного времени переходов в рамках математических моделей ситуационного взаимодействия (режимов) функционирования бортовой аппаратуры.

С формальной точки зрения поиск осуществляется среди некоторого множества элементов X_b , которые образуют область поиска в ГМ. Содержательно, совокупность переходов будет определять последовательность тестовых воздействий, необходимых для достоверного определения технического состояния в i -м режиме БРЭА $\bar{x}_i = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, $i = \overline{1, n}$, $x_m \in X_b$, $m = \overline{1, k}$. В зависимости от ситуационного взаимодействия (режимов работы) подсистем БРЭА множество векторов \bar{x}_i определяет векторное пространство тестового контроля БРЭА АКА. Размерность данного пространства характеризуется, прежде всего, объемом решаемых задач бортовой аппаратурой. В свою очередь, каждая задача определяется количеством ситуаций взаимодействия между подсистемами бортовой аппаратуры. С математической точки зрения, переход от i -й последовательности тестовых воздействий \bar{x}_i , обусловленных k -й ситуацией взаимодействия между подсистемами, до j -й последовательности \bar{x}_j , обусловленных s -й ситуацией при различных режимах работы БА, может быть определен следующим образом:

$$\bar{x}_j = B \bar{x}_i, j = \overline{1, g}, i = \overline{1, n}, (x_i, x_j) \in X_b, \quad (3)$$

где $B = \|b_{ks}\|$, $k = \overline{1, h}$, $s = \overline{1, b}$ – прямоугольная матрица размером $h \times b$ с вещественными элементами, характеризующими взаимодействия подсистем бортовой аппаратуры при s -й ситуации.

Необходимо отметить, что элементы b_{ks} принимают бинарное значение: «1» – когда есть взаимодействие, «0» – когда его нет. В общем случае матрица B будет определять ситуационное взаимодействие подсистем бортовой аппаратуры в рамках рассматриваемых режимов работы БРЭА (состояний – V) с управляющими воздействиями на переключение временными командами (E). С учетом выражения (3) постановка задачи (2) может быть уточнена следующим образом:

$$\begin{cases} M_\phi = \langle \Omega, \tau \rangle; \\ \bar{x}_j^s = B \bar{x}_i^k, j = \overline{1, g}, i = \overline{1, n}, (x_i, x_j) \in X_B; \\ A(M_\phi, X_B(B)) \Rightarrow T_k(A) \xrightarrow{A \in \Omega_A} \min; \\ B(V, E). \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим возможность использования известных методов для оптимизации задачи контроля БРЭА КА по минимальному суммарному времени выполнения команд на основе ГМ.

Анализ возможности синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры автономных космических аппаратов в ситуационных взаимодействиях подсистем графовыми моделями

Задача поиска оптимальных в плане оперативности маршрутов имеет в комбинаторной оптимизации известные интерпретации. Так, рассмотренная постановка задачи (4) может быть рассмотрена как задача китайского почтальона (ЗКП) [6]. Отметим, что ЗКП заключается в поиске кратчайшего цикла, проходящего через каждое ребро модели. Возможность нахождения кратчайших циклов при анализе ГМ БРЭА обусловлена наличием на практике, практически всегда, управляющего воздействия, позволяющего привести бортовую аппаратуру в исходное состояние. Вместе с тем в работе предлагается решать задачу китайского почтальона не за счет анализа полной модели функционирования бортовой аппаратуры, а на основе анализа ситуационного взаимодействия подсистем БРЭА. Другими словами, тестовая последовательность для определения вида технического состояния бортовой аппаратуры будет определяться исходя из предстоящего режима работы БРЭА.

Известно, что одним из этапов решения ЗКП является поиск кратчайших путей (КП) между вершинами модели (1). Задача о поиске КП – это задача поиска самого короткого пути (цепи) между двумя точками (вершинами) на графе, в которой минимизируется сумма весов ребер, составляющих путь. Данная задача является одной из важнейших классических задач теории графов. В настоящее время существует несколько десятков алгоритмов для решения задачи о КП. В табл. 1 приведен сравнительный анализ основных алгоритмов нахождения КП при решении ЗКП.

Таблице 1

Основные алгоритмы поиска КП и их вычислительная сложность

Название алгоритма	Сложность	Краткое описание
Дейкстры	$O(V \cdot V + E)$	Находит кратчайший путь от одной из вершин графа до всех остальных. Алгоритм работает только для графов без ребер отрицательного веса
Флойда – Уоршелла	$O(V^3)$	Находит кратчайшие пути между всеми вершинами взвешенного ориентированного графа
Левита	$O(V \cdot E)$	Находит кратчайшее расстояние от одной из вершин графа до всех остальных. Алгоритм также работает для графов с ребрами отрицательного веса
Джонсона	$O(V^2 \log(V) + V \cdot E)$	Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин взвешенного ориентированного графа
Симбела	$O(V^4)$	Находит кратчайшие пути за линейное количество манипуляций (умножения) с матрицей
Алгоритм Ли (волновой алгоритм)	–	Основан на методе поиска в ширину

Как видно из табл. 1, оперативность контроля БРЭА T_k будет являться функцией от вычислительной сложности алгоритмов, которая оценивается временем работы. Чем быстрее будет определяться кратчайший путь, тем будет выше оперативность контроля БРЭА АКА:

$$T_k = O(V, E), \quad (5)$$

где $O(V, E)$ – функция, характеризующая зависимость оперативности определения вида технического состояния от сложности алгоритма нахождения кратчайших путей.

Рассмотрим сложность представленных в табл. 1 алгоритмов (рис. 1) в зависимости от числа состояний подсистем БРЭА АКА. В алгоритме Ли [7] заложен основной принцип «поиск в ширину», т.е. в результате работы алгоритма осуществляется систематический обход всех ребер для «открытия» всех вершин и вычисляется расстояние (минимальное количество ребер) до каждой достижимой вершины. Такой подход для задачи контроля БРЭА является не целесообразным, так как обладает большой погрешностью.

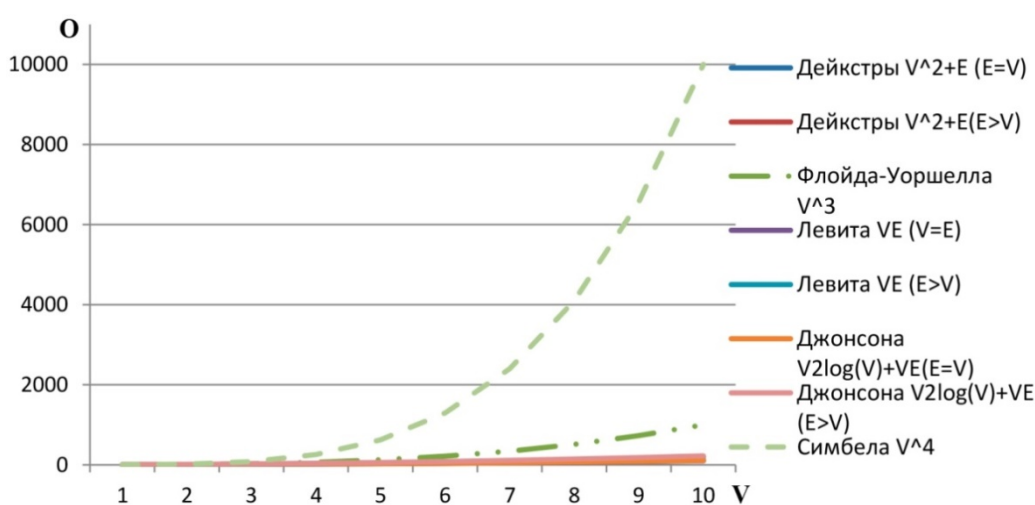


Рис. 1. График вычислительной сложности всех алгоритмов

На рис. 1 можно заметить, что алгоритмы Флойда – Уоршелла и Симбела имеют очень высокие значения сложности (даже при $V = 10$), что не позволяет рассматривать их применение в качестве основы для разработки тестов. Анализ алгоритмов Дейкстры, Левита и Джонсона показал, что время их работы при синтезе тестов будет зависеть не только от количества вершин, но и от количества ребер. Следовательно, необходимо рассмотреть следующие случаи:

- 1) $E = \min, E = V - 1$, когда количество ребер минимально;
- 2) $E = V$, когда количество ребер и вершин совпадает;
- 3) $E > V$, когда ребер больше вершин.

Обозначенные выше случаи соотношений вершин и дуг при графовом описании процесса функционирования БРЭА АКА в полном объеме отражают варианты модельного представления исходя из режимов работы бортовой аппаратуры. Поясним отдельно данное утверждение. В зависимости от режима работы каждая из подсистем БРЭА может взаимодействовать определенным образом, т.е. в рамках рассмотрения полной модели при различных режимах могут быть получены все три случая. Другими словами, данные случаи определяются ситуацией взаимодействия подсистем БРЭА АКА. На рис. 2 представлены результаты работы алгоритмов (в зависимости O от V).

Анализ полученных результатов показал (рис. 2,а,б), что алгоритм Левита оказывается наиболее оперативным при выполнении следующего условия: $E \leq V$, ребер меньше или равно количеству вершин. Алгоритм Дейкстры обладает максимальной эффективностью при выполнении условия: $E > V$, ребер больше вершин (рис. 2,в). Таким образом, в зависимости от ситуации взаимодействия может быть использован один из представленных алгоритмов.

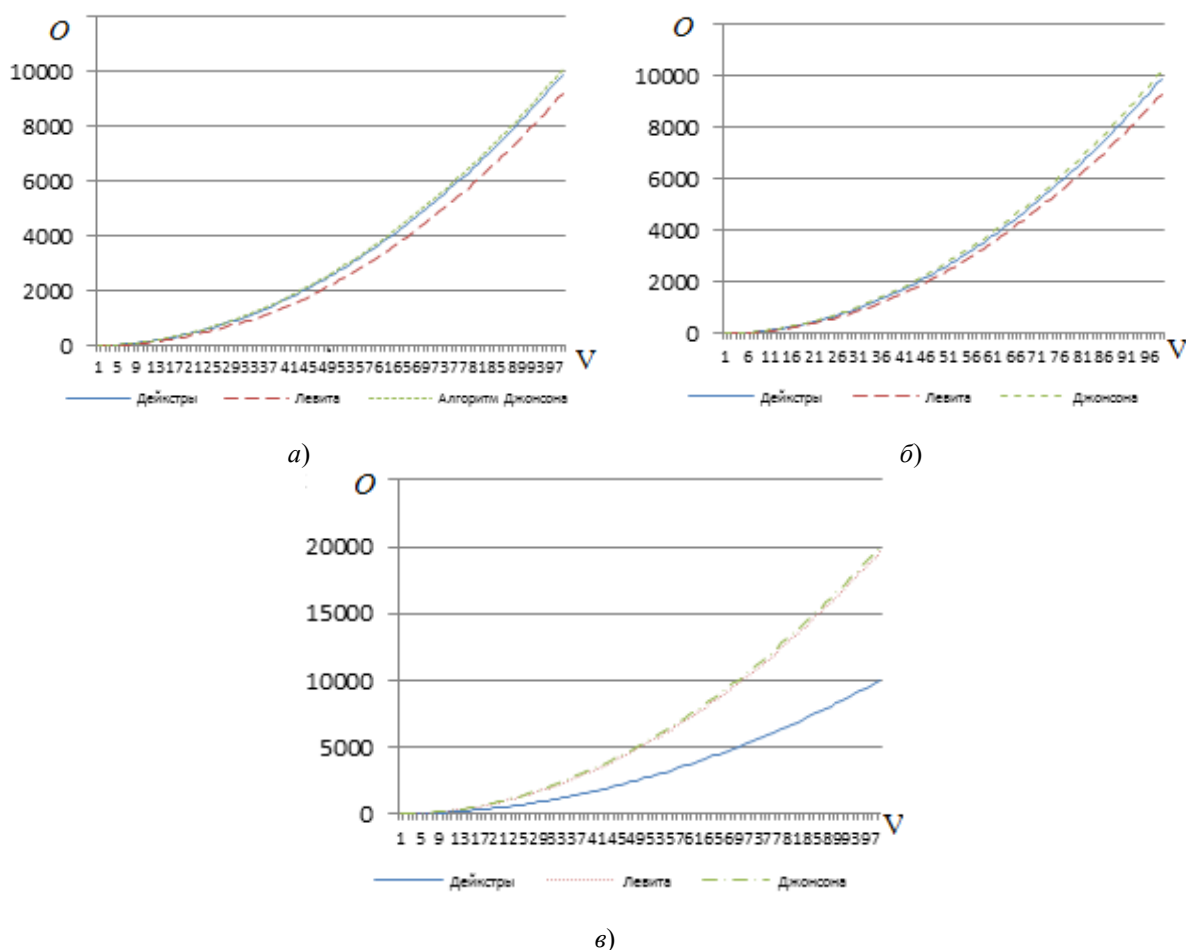


Рис. 2. Оценки вычислительной сложности алгоритмов:
 а – $E = \min$, $E = V - 1$; б – $E = V$; в – $E > V$

Алгоритм синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры автономных космических аппаратов в ситуационных взаимодействиях подсистем графовыми моделями

Для описания процессов функционирования БРЭА АКА введено понятие графовых моделей. С целью получения практических результатов тестового контроля бортовой аппаратуры рассмотрим применение конкретного математического инструмента, попадающего под понятие графовой модели. Наиболее распространенным с практической точки зрения является математический аппарат конечных автоматов [8].

Конечно-автоматное представление процессов функционирования БРЭА обладает рядом достоинств, а именно: развитость теории, относительная простота и адекватность описания дискретных объектов [8]. В свою очередь, декомпозированное представление конечно-автоматной модели позволит решить проблему проклятья размерности [5]. Под декомпозицией конечного автомата понимается его представление в виде других автоматов сети. Каждый из автоматов сети формализует работу подсистемы или нескольких подсистем БРЭА в зависимости логической декомпозиции.

С учетом вышесказанного разработан обобщенный алгоритм работы БСК БРЭА АКА с целью повышения оперативности определения вида ТС на основе конечно-автоматного представления (сетью автоматов) процессов функционирования (ситуационного взаимодействия) бортовой аппаратуры, схема которого представлена на рис. 3.

Условно работу данного алгоритма можно разделить на несколько этапов:

1. На *первом этапе* вводятся данные модели БРЭА (значения функции переходов, значения функции выхода). На их основе выбираем автомат сети A_i (блоки 1–3).

2. На *втором этапе* определяется режим работы БРЭА. Каждый из режимов будет определяться конкретным набором ситуаций взаимодействия подсистем (блок 4).

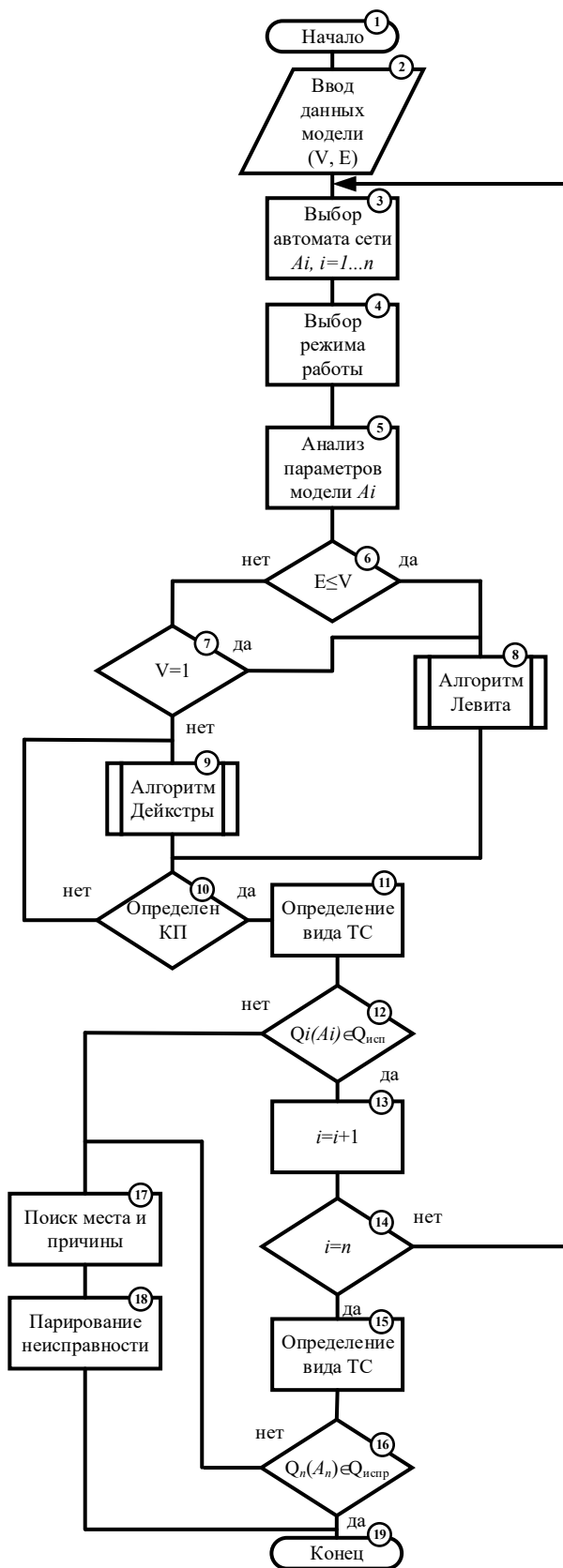


Рис. 3. Алгоритм работы системы контроля с целью повышения оперативности определения вида ТС бортовой аппаратуры

3. Далее анализируются параметры модели A_i в зависимости от ситуационного взаимодействия (режима работы) БРЭА, подсчитывается количество состояний и переходов (блок 5). Проверяется условие выбора алгоритмов на основе сравнения E и V (блоки 6, 7). Выбирается соответствующий алгоритм нахождения КП (Дейкстры или Левита) (блоки 8, 9).

4. На основе выбранного алгоритма определяется тестовая последовательность в зависимости от ситуационного взаимодействия подсистем (режима работы) БРЭА (блок 10).

5. Далее определяется вид технического состояния БРЭА АКА (блок 11). В случае, если контролируемые параметры Y_i бортовой аппаратуры в рамках тестового контроля совпадают с модельными ($Y_i \in Y_{испр}$) в каждый момент времени, то принимается решение об исправности аппаратуры, т.е. выполняется условие $Q_i(A_i) \in Q_{испр}$ с учетом отображения (функции отнесения) – $\varphi^{-1} : Y \rightarrow Q$ (блоки 12–16).

6. Если в результате тестового контроля получено состояние, не принадлежащее множеству исправных, тогда принимается решение о возникновении неисправности в бортовой аппаратуре с последующим поиском места и причин неисправности и ее парирование (блоки 17, 18).

Рассмотрим применение данного алгоритма в рамках оценивания вида ТС бортовой системы контроля с использованием конечно-автоматной модели.

Пример реализации алгоритма синтеза оптимальных тестов типовой бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов

В качестве БРЭА рассмотрим штатную бортовую радиотелеметрическую систему (БРТС) БР-9ЦК-1 [10], которая используется для телеметрирования космического аппарата¹. В общем случае модель БР-9ЦК-1 представлена в виде сети автоматов, обозначенных в литературе [11, 12] логическими подсистемами (ЛПС). Рассмотрим в качестве примера некоторые ЛПС, описывающие режимы бортовой аппаратуры: ЛПС₁ – логическая подсистема, описывающая режимы работы центрального блока БРТС, ЛПС₂ – логическая подсистема, описывающая режимы запоминающего устройства (рис. 4,а,б).

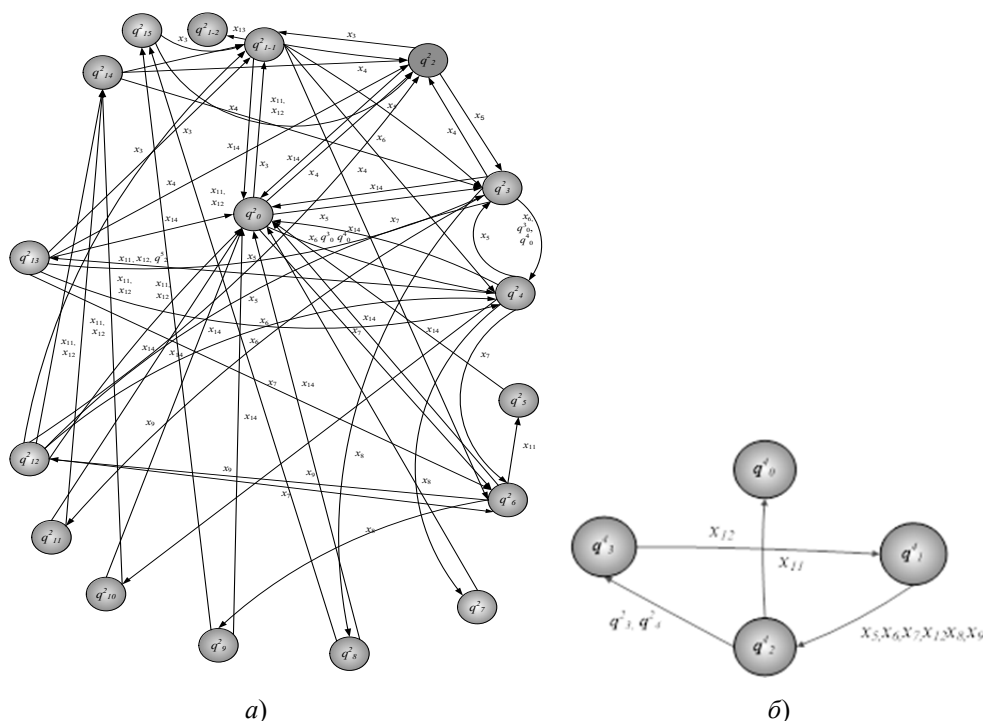


Рис. 4. Графовые модели: а – ЛПС₁; б – ЛПС₂

¹ 14С44 ДПМ ч. 1. Программа телеметрических измерений. Ч.1. Измерения системы БР-9ЦК-1. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2007. С. 32. ; 14С44 ИЭ20 ч. 1. Изделие 14С44. Инструкция по оценке работы бортовых систем. Оценка работы системы БР-9ЦК-1. Часть 1. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2007. 21 с.

Семантическая нагрузка элементов представленной модели на данном этапе является не существенной. Ввиду данного факта ограничимся визуальным восприятием графового представления. На рис. 4,а,б введены обозначения: q_i^j – i -е состояния j -й ЛПС, x_k – управляющие воздействия (команды) на переключение режимов работы бортовой аппаратуры $k = \overline{1, n}$.

Анализ оперативности рассмотренных выше алгоритмов осуществлен для режимов БРТС БР-9ЦК-1 (рис. 4,а,б). Расчеты показали, что в соответствии с временными характеристиками выполнения команд управления ($t_j, j = \overline{1, m}, t_j \in T$) бортовой радиотелеметрической системой оперативность алгоритмов будет иметь следующие значения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета времени работы алгоритмов при нахождении КП для ЛПС БР-9ЦК-1, отн.ед.

Номер	V	E	Симбела	Флойда – Уоршелла	Левита	Джонсона	Дейкстры
ЛПС ₁	17	51	83521	4913	867	908,8	340
ЛПС ₂	4	4	256	64	16	20,8	20

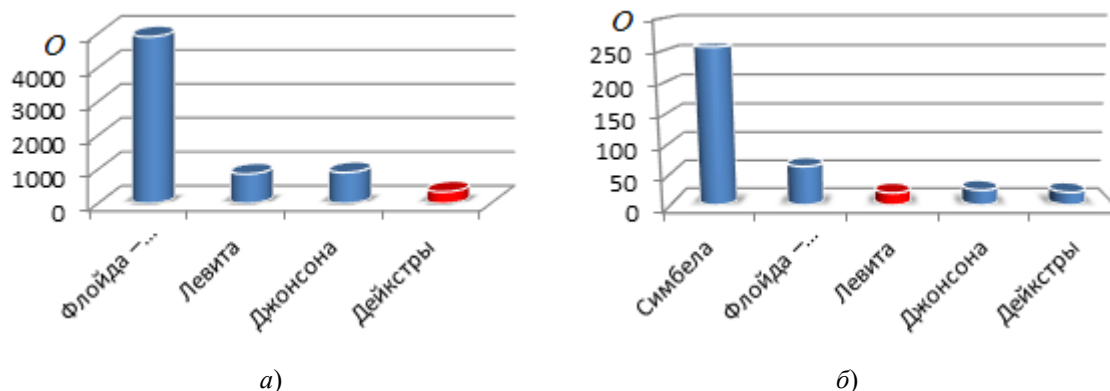


Рис. 5. Оперативность контроля: а – для логической подсистемы 1; б – для логической подсистемы 2

Временная сложность алгоритма Симбела для ЛПС₁ имеет достаточно большой показатель по сравнению с другими, поэтому на диаграмме он не представлен.

Исходя из представленных диаграмм (рис. 5), можно сделать вывод, что в ЛПС₂, при условии $E \leq V$, эффективнее по времени на 20 % будет алгоритм Левита. Для ЛПС₁, при условии $E > V$, выигрыш в оперативности будет в 2,5 раза больше, чем у алгоритма Дейкстры. Полученные результаты в полной мере подтверждают теоретические положения о возможности разработки программно-алгоритмического обеспечения бортовых систем контроля на основе алгоритмов поиска кратчайших путей в рамках решения задачи китайского почтальона при синтезе тестов. В свою очередь, выбор алгоритма с наименьшей временной сложностью в зависимости от ситуационного взаимодействия (режимов работы) БРЭА АКА позволяет повысить оперативность определения вида ТС в целом.

Заключение

Учет ситуационного взаимодействия подсистем БРЭА АКА в различных режимах работы бортовой аппаратуры позволяет решать задачу контроля с применением известных методов комбинаторной оптимизации. Выбор способа нахождения КП в зависимости от ситуации (режима) является эффективным подходом для повышения оперативности контроля бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Данный подход на практике может быть использован при переносе функции принятия решения о виде технического состояния аппаратуры на «борт» космических аппаратов в рамках концепции по созданию распределенных систем диагностирования.

Список литературы

1. Байлов В. В., Плаксиенко В. С. Диагностика и обслуживание радиоэлектронных систем бытового назначения : учеб. пособие. Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. 64 с.
2. Хабаров В. Л., Куликов Г. В. Парамонов А. А. Техническая диагностика и ремонт бытовой радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие. М. : Горячая линия. Телеком, 2004.
3. Емеличев В. А., Ковалев М. М., Кравцов М. К. Многогранники, графы, оптимизация (комбинаторная теория многогранников). М., 1981. 341 с.
4. Алексеев В. Е., Таланов В. А., Графы. Модели вычислений. Структуры данных : учеб. пособие. М. : НГУ им. Н. И. Лобачевского, 2004.
5. Jolliffe I. T. A Note on the Use of Principal Components in Regression // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). 1982. Vol. 31, № 3. P. 300–303.
6. Kuhn H. W. The Hungarian Method for the assignment problem. 1955. P. 83–97.
7. Lee C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications // IRE Transactions on Electronic Computers. 1961. Vol. EC-10, № 2. P. 364–365.
8. Телеметрические системы разгонного блока «Фрегат». М. : ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2007. С. 31.
9. Лоскутов А. И., Козырев Г. И. Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. 158 с.
10. Дунаев В. В. Занимательная математика. Множества и отношения. СПб. : БХВ-Петербург, 2008. 336 с.
11. Лоскутов А. И., Клыков В. А. Методика синтеза математической модели функционирования бортовых систем изделий ракетно-космической техники на основе логической декомпозиции // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 5. С. 7–18.

References

1. Baylov V.V., Plaksienko V.S. *Diagnostika i obsluzhivanie radioelektronnykh sistem bytovogo naznacheniya: ucheb. posobie = Diagnostics and maintenance of radio-electronic systems for household use : textbook*. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007:64. (In Russ.)
2. Khabarov V.L., Kulikov G.V. Paramonov A.A. *Tekhnicheskaya diagnostika i remont bytovoy radioelektronnoy apparatury: ucheb. posobie = Technical diagnostics and repair of household radio-electronic equipment : textbook*. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2004. (In Russ.)
3. Emelichev V.A., Kovalev M.M., Kravtsov M.K. *Mnogogranniki, grafy, optimizatsiya (kombinatornaya teoriya mnogogrannikov) = Polyhedra, graphs, optimization (combinatorial theory of polyhedra)*. Moscow, 1981:341. (In Russ.)
4. Alekseev V.E., Talanov V.A., *Grafy. Modeli vychisleniy. Struktury dannykh: ucheb. posobie = Models of calculations. Data structures : textbook*. Moscow: NGU im. N. I. Lobachevskogo, 2004. (In Russ.)
5. Jolliffe I.T. A Note on the Use of Principal Components in Regression. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. 1982;31(3):300–303.
6. Kuhn H.W. The Hungarian Method for the assignment problem. 1955:83–97.
7. Lee C.Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*. 1961:EC-10(2):364–365.
8. *Telemetricheskie sistemy razgonnogo bloka «Fregat» = Telemetry systems of the Fregat upper stage*. Moscow: FGUP NPO im. S. A. Lavochkina, 2007:31. (In Russ.)
9. Loskutov A.I., Kozzyrev G.I. *Osnovy ispytaniy bortovykh radioelektronnykh sistem = Fundamentals of testing of onboard radio-electronic systems*. Saint Petersburg: VKA im. A. F. Mozhayskogo, 2013:158. (In Russ.)
10. Dunaev V.V. *Zanimatel'naya matematika. Mnozhestva i otnosheniya = Entertaining math. Sets and relations*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2008:336. (In Russ.)
11. Loskutov A.I., Klykov V.A. Method of synthesis of mathematical model of functioning of boron systems of rocket and space technology products on the basis of logical decomposition. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Instruments and systems. Management, control, diagnostics*. 2016;(5):7–18. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Иванович Лоскутов

доктор технических наук,
начальник кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Andrey I. Loskutov

Doctor of technical sciences,
head of the sub-department of telemetric systems,
integrated processing and information protection,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Александр Николаевич Шиян

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

Aleksandr N. Shiyan

Deputy head of the department,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Владимир Алексеевич Клыкков

кандидат технических наук,
преподаватель кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: v.klikoff86@mail.ru

Vladimir A. Klykov

Candidate of technical sciences,
lecturer of the sub-department
of telemetry systems, integrated processing
and information security,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Станислав Алексеевич Неупокоев

курсант,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: stas.neupokoev.99@mail.ru

Stanislav A. Neupokoev

Cadet,
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 27.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 29.06.2022

Принята к публикации/Accepted 28.07.2022

УДК 681.586
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-17

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ

А. В. Гладков¹, К. И. Бастрыгин², В. Н. Пономарев³,
А. А. Трофимов⁴, С. А. Здобнов⁵

^{1,2,3,5} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

⁴ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ alexey.gladkov.1@yandex.ru, ² sensor@niifi.ru, ³ revik2296@gmail.com, ⁴ alex.t1978@mail.ru, ⁵ sa_zdobnov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При проектировании датчиков для новых изделий ракетно-космической техники разработчику приходится решать ряд задач по обеспечению противоречивых требований, предъявляемых к датчиковой аппаратуре, а именно: высокая точность измерения при воздействии жестких дестабилизирующих факторов, малое энергопотребление и высокая помехозащищенность, обеспечение высоких показателей надежности и качества аппаратуры, требующее всесторонней отработки конструктивно-технологических решений при минимальных сроках проектирования. Для решения перечисленных задач и устранения противоречий между сжатыми сроками разработки и необходимостью обеспечения высокого качества изделий и их серийно-пригодности авторами применен комплексный анализ технического уровня датчиков на этапе разработки. *Материалы и методы.* Для определения состояния разработок и выявления тенденций их развития были выбраны зарубежные и отечественные датчики линейных перемещений и частоты вращения, аналогичные по назначению, принципу действия, метрологическим характеристикам, условиям эксплуатации и являющиеся одними из лучших по технико-экономическим показателям. Построены циклограммы основных единичных показателей датчиков линейных перемещений и частоты вращения. *Результаты.* В результате проведенного комплексного анализа установлено, что по своему техническому уровню разработанные датчики линейных перемещений и частоты вращения соответствуют лучшим мировым аналогам.

Ключевые слова: ракетно-космическая техника, датчик, единичный показатель, техническое задание, технический уровень

Для цитирования: Гладков А. В., Бастрыгин К. И., Пономарев В. Н., Трофимов А. А., Здобнов С. А. Комплексный анализ технического уровня датчиков для систем ракетно-космической техники на этапе разработки // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 139–146. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-17

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE TECHNICAL LEVEL OF SENSORS FOR ROCKET AND SPACE ENGINEERING SYSTEMS DURING THE DEVELOPMENT STAGE

A.V. Gladkov¹, K.I. Bastrygin², V.N. Ponomarev³, A.A. Trofimov⁴, S.A. Zdobnov⁵

^{1,2,3,5} Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

⁴ Penza State University, Penza, Russia

¹ alexey.gladkov.1@yandex.ru, ² sensor@niifi.ru, ³ revik2296@gmail.com, ⁴ alex.t1978@mail.ru, ⁵ sa_zdobnov@mail.ru

Abstract. *Background.* When designing sensors for new rocket and space technology products, the developer has to solve a number of problems to ensure contradictory requirements for sensor equipment, namely: high measurement accuracy under the influence of harsh destabilizing factors, low power consumption and high noise immunity, ensuring high reliability and quality of equipment, requiring a comprehensive study of design and technological solutions with minimal design time. To solve these problems and eliminate the contradictions between the short development time and the need to ensure high quality of products and their serial availability, the authors applied a comprehensive analysis of the technical level of sensors at the stage of development. *Materials and methods.* To determine

the state of development and identify trends in their development, foreign and domestic linear displacement and rotational speed sensors similar in purpose, operating principle, metrological characteristics, operating conditions and being among the best in technical and economic indicators were selected. The cyclograms of the main unit indicators of linear displacement and rotation frequency sensors were built. *Results.* As a result of the comprehensive analysis, it was found that the developed linear displacement and rotational speed sensors correspond to the best world analogues in terms of their technical level.

Keywords: rocket and space technology, sensor, single indicator, technical specifications, technical level

For citation: Gladkov A.V., Bastrygin K.I., Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Zdobnov S.A. Comprehensive analysis of the technical level of sensors for rocket and space engineering systems during the development stage. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):139–146. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-17

Введение

Необходимость на ранних стадиях разработки, в том числе при составлении технического задания (ТЗ), оценивать технические характеристики образцов, предлагаемых к проектированию в сравнении с характеристиками отечественных и зарубежных аналогов, позволяет более объективно оценить не только целесообразность затрат на проведение разработки, но и степень риска в получении ряда характеристик с учетом достигнутого мирового уровня. Особенно это касается технических характеристик, существенно превышающих отечественный и мировой уровень, так как в этом случае реализация требований ТЗ будет связана с повышенными экономическими затратами, а степень риска получения отрицательного результата значительно возрастает.

Важна объективная оценка результатов разработки, которая возможна через комплексный показатель технического уровня, позволяющий оценить как достоинства, так и наиболее слабые стороны разработки в сравнении с лучшими отечественными и зарубежными аналогами.

Сравнительная оценка технического уровня датчиков перемещения и частоты вращения

Для определения технического уровня разработанных конструкций датчиков перемещений и частоты вращения [1–5] для систем авиационной и ракетно-космической техники проведен сравнительный анализ их технического уровня с использованием ГОСТ Р 55975–2014¹.

Процесс оценки технического уровня планируемых к разработке датчиков перемещения и частоты вращения состоит из следующих этапов:

- формирование перечня аналогов для каждого образца датчиков;
- формирование показателей качества «идеального» образца для дальнейшей оценки;
- определение относительных показателей качества оцениваемых датчиков;
- комплексная оценка технического уровня.

Для определения состояния разработок и выявления тенденций их развития были выбраны лучшие по технико-экономическим показателям модели зарубежного и отечественного производства, аналогичные по назначению и условиям эксплуатации. Оцениваемые образцы сравниваются по одинаковой номенклатуре технико-экономических показателей.

Среди рассмотренных преобразователей отобраны образцы, удовлетворяющие современному техническому уровню по совокупности показателей по точности, надежности и эксплуатационных характеристик.

Выбор аналогов проводился по журналам «Приборы», «Датчики и системы», «Сенсор», «Современные технологии автоматизации», по тематическим подборкам из реферативных журналов «Изобретения стран мира», «Известия вузов», по бюллетеням «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», по официальным изданиям патентных ведомств США, Великобритании, Германии, Франции, Японии, по патентным бюллетеням,

¹ ГОСТ Р 55975–2014. Сравнительная оценка технического уровня и выбор по показателям качества.

по описаниям изобретений к авторским свидетельствам и патентам Российской Федерации, по каталогам и проспектам ведущих зарубежных фирм.

Следующим этапом оценки технического уровня является сравнение предложенного датчика с «идеальным образцом» и аналогами по отдельным единичным показателям по формулам

$$q_j = \frac{p_j}{p_{ju}} \tag{1}$$

и

$$q_j = \frac{p_{ju}}{p_j}, \tag{2}$$

где p_j – значение j -го единичного показателя оцениваемого датчика; p_{ju} – значение j -го единичного показателя «идеального образца».

Формула (1) применяется для определения значений стимуляторов-показателей датчиков, увеличение значений которых приводит к росту технического уровня, а формула (2) – для определения значений дестимуляторов, увеличение значений которых приводит к снижению технического уровня датчиков.

Если наибольшее изменение какого-либо единичного показателя приводит к значительному улучшению технического уровня, вместо формул (1) и (2) используем формулы [5]:

$$q_j = e^{\frac{0,69 p_j}{p_{ju}}} - 1, \tag{3}$$

$$q_j = e^{\frac{0,69 p_{ju}}{p_j}} - 1. \tag{4}$$

Состав единичных показателей качества для сравнения представлен в табл. 1 и 2, а также в виде циклограмм, приведенных на рис. 1.

Таблица 1

Состав единичных показателей качества датчиков линейных перемещений

Наименование характеристики и единицы измерения	Коэффициенты весомости	«Идеальный образец» ДПА	Разрабатываемый объект	SD-081 (Bruel&KjaerVibro GmbH), Дания)	ДВТ 20 и ИП 34 (НПП «Вибробит»)	Относительные показатели, q_i		
						Разрабатываемый объект	SD-081 (Bruel&KjaerVibro GmbH), Дания)	ДВТ 20 и ИП 34 (НПП «Вибробит»)
Диапазон измерений, мм	0,1	0–20	0–20	1,2–4,7	0–4	1,0	0,175	0,20
Основная погрешность, %	0,11	±0,5	±0,5	±5	±4	0,99	0,07	0,09
Частотный диапазон, Гц	0,06	10 000	0–300	0–10 000	500	0,04	0,99	0,07
Температурный диапазон, °С	0,08	минус 253 ... 200	минус 253 ... 200	минус 30 ... 65	минус 40 ... 70	1,0	0,14	0,17
Показатель технического совершенства по точности		1,0	0,78	0,31	0,13	Выше уровня аналогов		
Показатель технического совершенства по надежности и условиям эксплуатации		1,0	1	0,14	0,17	Выше уровня аналогов		
Комплексный показатель технического уровня		1,0	0,83	0,25	0,28	Выше уровня аналогов		

Таблица 2

Состав единичных показателей качества датчиков частоты вращения

Наименование характеристики и единицы измерения	Коэффициенты весомости	«Идеальная» ДПА	Разрабатываемая ДПА	«Bently Nevada Inc.» (Тахометр 3500/50)	«Emerson Process Management» (CSI 6300 SIS)	Относительные показатели, q_i		
						Разрабатываемая ДПА	Аналог «Bently Nevada Inc.», США	Аналог «Emerson Process Management», США
Диапазон измерений, об/мин	0,08	0–130 000	0–130 000	1–99 999	5–65 535	1	0,76	0,1
Основная погрешность, %	0,11	±0,01	±0,5	±0,01	±1	0,01	1	0,006
Температурный диапазон, °С	0,1	минус 253 ...200	минус 253 ...200	минус 30...65	минус 20...65	1	0,14	0,012
Показатель технического совершенства по точности		1,0	0,42	0,89	0,045	Ниже мирового уровня		
Показатель технического совершенства по надежности и условиям эксплуатации		1,0	1	0,14	0,012	Превышает мировые достижения		
Комплексный показатель технического совершенства		1,0	0,62	0,63	0,034	Соответствует мировым достижениям		

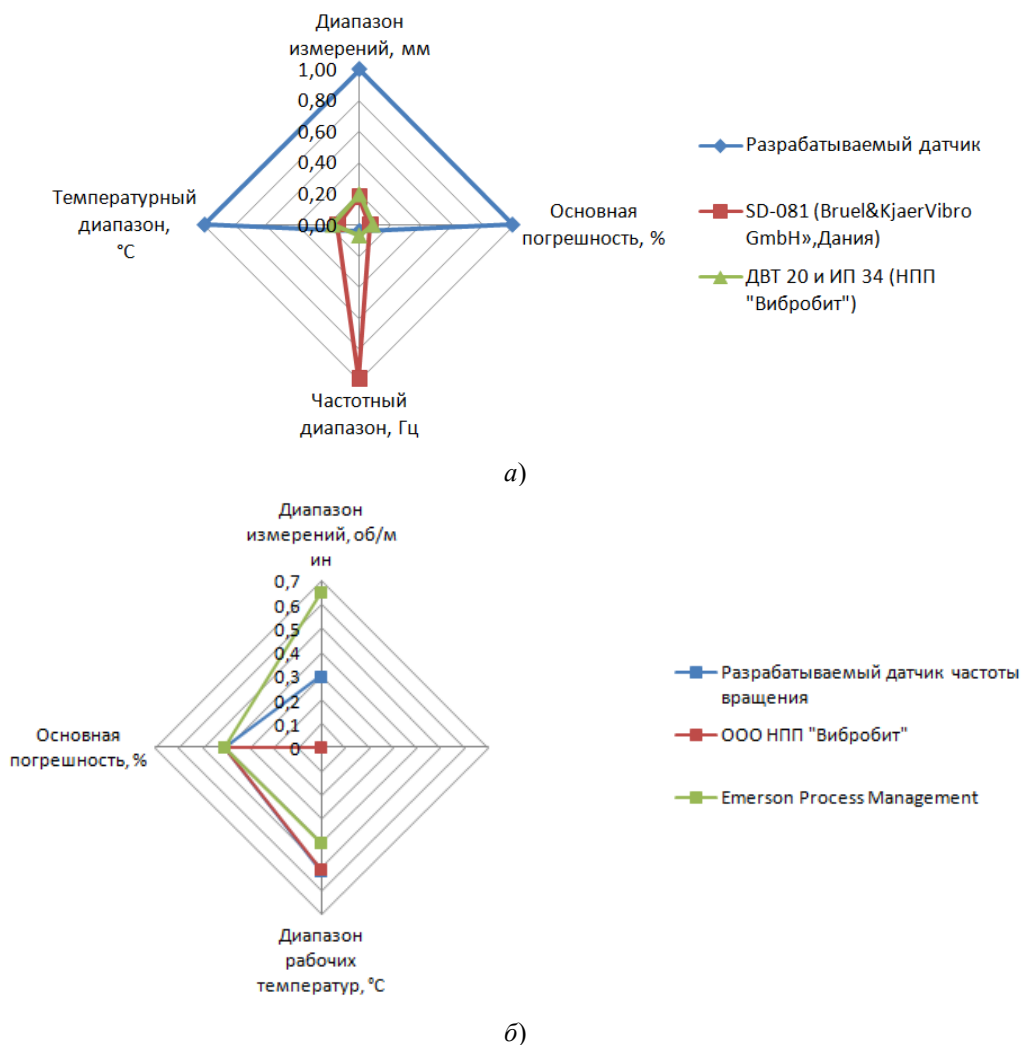


Рис. 1. Циклограмма основных единичных показателей:
 а – датчиков линейных перемещений; б – датчиков перемещения и частоты вращения

Сравнительная оценка технического уровня проводилась в сравнении с «идеальными» образцами датчиков линейного перемещения и частоты вращения. Формирование «идеальных» образцов проводилось по всем анализируемым показателям исследуемых датчиков, причем значения важнейших единичных технико-экономических показателей «идеального» образца выбирались с учетом перспективных требований отрасли.

Анализ тенденций развития датчиков перемещения и частоты вращения

Анализ тенденций развития является составной частью исследований по определению перспектив развития рынка производства датчиков. Потенциал рассматриваемого анализа выражается в том, что информация об изобретениях и других объектах промышленной собственности становится доступной раньше (на 3–5 лет) появления на рынке продукции с использованием этих изобретений. Это позволяет предвидеть ситуацию на рынке продукции на основе анализа патентной информации с некоторым упреждением во времени, достаточным для выработки необходимых решений [6].

Поиск патентной информации по датчикам перемещения и частоты вращения проведен за период 2017–2021 гг. полным описанием изобретений национальных патентных ведомств и международных организаций ведущих стран мира, доступных через Интернет по следующим адресам:

ВОИС (Всемирная организация интеллектуальной собственности): <http://www.wipo.org/>;

ЕП (Европейская патентная организация): <http://ep.espacenet.com>;

США: <http://www.uspto.gov>;

Германия: <http://www.deutsches-patentamt.de>;

Франция: <http://www.inp.fr>;

Великобритания: <http://www.patent.dow.uk>;

Россия: <http://www.fips.ru>.

Анализ состояния разработок в области датчиков перемещения и частоты вращения показал, что общий объем патентно-защищенных разработок в данной области в Китае (23 патента) превышает объем разработок в России (6 патента), США (7 патентов), ВОИС (3 патента), Канаде (1 патент), Корее (1 патент), ЕВП (1 патент) (рис. 2).

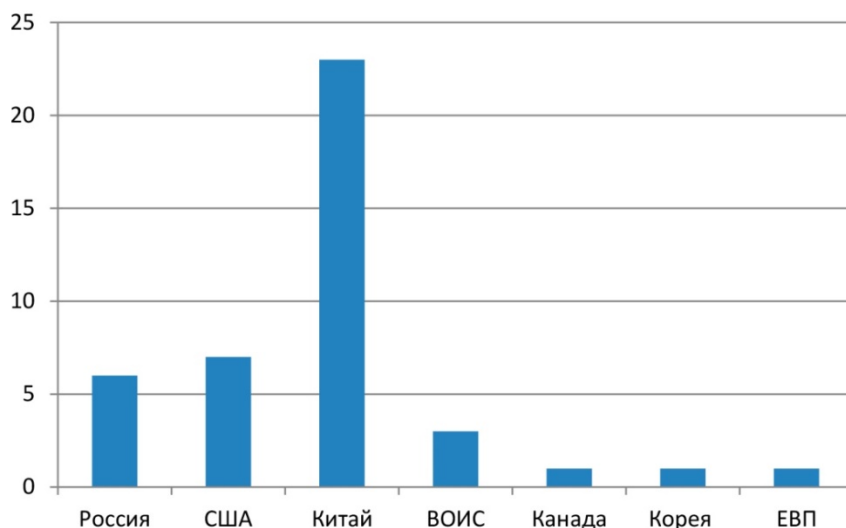


Рис. 2. Распределение охранных документов по ведущим странам

Одним из наиболее распространенных методов систематизации сведений об изобретениях, широко используемых в настоящее время для определения изобретательской активности, является метод распределения изобретений по годам приоритета или выдачи охранных документов.

В табл. 3 и на рис. 3 представлено распределение количества заявок на изобретения по годам и рост количества заявок.

Таблица 3

Распределение суммарного количества заявок по годам

Объект техники и его составная часть	Количество патентов, опубликованных заявок по годам подачи заявки (исключая патенты-аналоги)				
	2017	2018	2019	2020	2021
Количество заявок по годам	4	13	4	10	11
Рост количества заявок	4	17	21	31	42

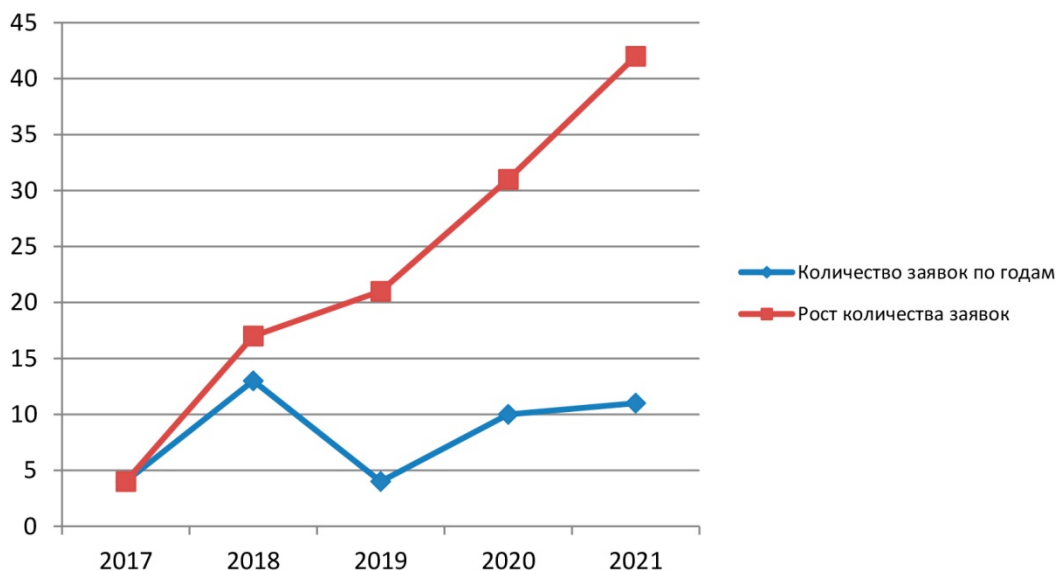


Рис. 3. Динамика патентования и рост суммарного количества заявок

Для определения тенденций развития были проанализированы описания изобретений и патенты, найденные в процессе поиска. Были установлены задачи изобретений и технический результат, которые отображают технико-экономические показатели, улучшение которых может быть важным для развития конкретного объекта техники. Чтобы оценить, какая из тенденций развития наиболее значима для датчиков перемещения и частоты вращения, определяются коэффициенты весомости.

В результате анализа описаний патентов выявлены основные технико-экономические показатели датчиков перемещения и частоты вращения, которые представлены в табл. 4.

Таблица 4

Перечень патентов, направленных на решение определенных задач

Наименование технико-экономических показателей	Количество охранных документов (коэффициенты весомости)
1	2
Улучшение метрологических характеристик (точности, чувствительности, стабильности измерений) RU 2 624 844 C2, RU 2 606 936 C1, WO 2021261731 (A1), EP3620242 (A1), US 2022029505 (A1), CN109073670 (A), CN109099060 (A), CN208283519 (U), CN108957033, US10118250, US2018210004, US2018095102, US2019086236, CN111780656, US2019086236, CN111780656, CN211014344, RU2715769C1, RU2654363C2, RU 2713964, US2018151059, CN112963245, CN212274856, WO2020073604, CN210954086, CN110887512, CN110988379, CN214011274, CN213986523, CN113189361	30 (0,41)
Расширение функциональных возможностей RU 2 606 936 C1, CA3120171 (A1), CN208283519 (U), CN106770631 (A)	4 (0,05)

Окончание табл. 4

1	2
Улучшение конструкции EP3620242 (A1), CA3120171 (A1), US2018210004, CN108225257, CN110631495, CN208705350, CN207067163, CN207133308, CN208224296, CN209400559, CN113189361, CN213167908, RU2713964, US2018151059, CN213986523, CN113189361	16 (0,22)
Повышение надежности RU 172 091 U1, US2022029505 (A1), KR20210156155 (A), CA3120171 (A1), WO2021238451 (A1), CN208283519 (U), US2018095102, CN108225257, CN110631495, CN208705350, US2019086236, CN111780656, CN207133308, CN208224296, CN209400559, RU2715769C1, RU2654363C2, US2021356489, CN112963245, CN212274856, WO2020073604, CN213986523, CN113189361	23 (0,32)
ВСЕГО	73

Примечание: итоговое количество охранных документов превышает количество найденных релевантных документов в связи с тем, что некоторые изобретения направлены на решение сразу нескольких задач.

По приведенным в табл. 4 данным можно сделать вывод, что основными направлениями совершенствования датчиков перемещения и частоты вращения являются:

- улучшение метрологических характеристик (точности, чувствительности, стабильности измерений);
- повышение надежности;
- улучшение конструкции.

Заключение

В результате проведенного комплексного анализа установлено, что разрабатываемые датчики линейных перемещений и частоты вращения превосходят аналоги и приближаются к мировому уровню по диапазону измерений, частотному диапазону измерений, основной погрешности и температурному диапазону.

Анализ информации, представленной в табл. 1–4 позволяет сделать вывод о том, что разрабатываемые датчики по функциональным возможностям и техническому совершенству не уступают зарубежным и отечественным аналогам. Следует также отметить, что технический уровень разработок к моменту организации массового производства будет соответствовать техническому уровню лучших образцов продукции фирм-конкурентов.

Список литературы

1. Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. 174 с.
2. Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 24–27.
3. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.
4. Гаврилов В. А., Трофимов А. А. Система измерений линейных перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 44–46.
5. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. А., Нефедьев Д. И. Датчики частоты вращения : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. 80 с.
6. Скорнякова Э. П., Омарова Т. Б., Чельшева О. В. Методические рекомендации по проведению патентных исследований. М. : ВНИИПИ, 1997. 171 с.

References

1. Trofimov A.N., Trofimov A.A. *Vzaimoinduktivnye datchiki peremeshcheniy: monografiya = Mutually inductive displacement sensors : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2009:174. (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. Trofimov A.A., Konakov N.D. Transformer displacement sensors with extended measurement range. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):8–10. (In Russ.)
4. Gavrilov V.A., Trofimov A.A. System of linear displacement measurements. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):44–46. (In Russ.)
5. Dmitrienko A.G., Trofimov A.A., Nefed'ev D.I. *Datchiki chastoty vrashcheniya: ucheb. posobie = Speed sensors : textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2015:80. (In Russ.)
6. Skornyakova E.P., Omarova T.B., Chelysheva O.V. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu patentnykh issledovaniy = Methodological recommendations for conducting patent research*. Moscow: VNIPI. 1997:171. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Владимирович Гладков

главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: alexey.gladkov.1@yandex.ru

Aleksey V. Gladkov

Chief specialist,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Кирилл Игоревич Бастрыгин

главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: sensor@niifi.ru

Kirill I. Bastrygin

Chief specialist,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Владислав Николаевич Пономарев

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: revik2296@gmail.com

Vladislav N. Ponomarev

Design engineer,
Scientific Research Institute
of 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: alex.t1978@mail.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)

Сергей Александрович Здобнов

главный инженер,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: sa_zdobnov@mail.ru

Sergey A. Zbodnov

Chief engineer,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 20.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 22.06.2022

Принята к публикации/Accepted 25.07.2022