

# ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

*Научно-производственный журнал*

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

*Лоскутов А. И., Клыков В. А., Ряхова Е. А.,*

*Столяров А. В., Шестопалова О. Л.*

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К КЛАСТЕРИЗАЦИИ  
КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ КАК ОДНОГО  
ИЗ ЭТАПОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА  
ИДЕНТИФИКАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

5

*Чебурахин И. Н., Ползунов И. В., Трофимов А. А.,*

*Ярославцева Д. А., Тюрин М. В.*

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО  
ДАТЧИКА СИСТЕМЫ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ

17

*Китаев А. С., Головяшкин А. Н.*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЛЕВОГО  
МДП-ФОТОТРАНЗИСТОРА (СЕНСОРНОГО ЭЛЕМЕНТА)  
ИНФРАКРАСНОГО ДАТЧИКА

25

### ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

*Дуников А. С., Бянкин А. А., Бардаев Э. А.*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ВЫБОРА  
ПАРАМЕТРОВ СИНГУЛЯРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО  
РАЗЛОЖЕНИЯ ДОДЕТЕКТОРНОЙ ЗАПИСИ СИГНАЛА

35

*Урваев И. Н.*

НАВИГАЦИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ  
МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

44

*Лихтциндер Б. Я., Бакай Ю. О.*

АДАПТИВНОЕ СЖАТИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ  
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

52

*Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И.*

НЕЗАВИСИМАЯ ПОВЕРКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
КОМПАРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

58

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

*Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И.,*

*Антипенко В. В., Мельников О. А., Карпанин О. В.*

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ

64

## **ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Крамм М. Н., Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Светлов А. В.*

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СЕРДЦА

73

*Баранов В. А., Печерская Е. А., Сафронов М. И., Тимохина О. А.*

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

ДЛЯ ТЕЛЕМЕДИЦИНСКОГО МОНИТОРИНГА

СОСТОЯНИЯ БОЛЬНОГО COVID-19

85

---

# MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

*Scientific-production journal*

---

№ 1, 2021

## CONTENT

### INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

*Loskutov A. I., Klykov V. A., Ryakhova E. A.,  
Stolyarov A. V., Shestopalova O. L.*

NEURAL NETWORK APPROACH TO CLUSTERIZATION  
OF CONTROLLED PARAMETERS AS ONE OF THE STAGES  
OF AUTOMATION OF THE IDENTIFICATION  
OF DIFFICULT TECHNICAL OBJECTS

5

*Cheburakhin I. N., Polzunov I. V., Trofimov A. A.,  
Yaroslavtseva D. A., Tyurin M. V.*

COMPUTER SIMULATION OF A STRAIN-RESISTIVE SENSOR  
OF AN ABSOLUTE PRESSURE SYSTEM

17

*Kitaev A. S., Golovyashkin A. N.*

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DESIGNING  
A FIELD-EFFECT MDP-PHOTOTRANSISTOR  
(SENSOR ELEMENT) OF AN INFARED SENSOR

25

### DEVICES AND METHODS OF MEASURING

*Dunikov A. S., Byankin A. A., Bardaev E. A.*

RECOVERY OF TELEMETRY INFORMATION OF AIRCRAFT  
TAKING INTO ACCOUNT THE CHOICE OF THE PARAMETERS  
OF THE SINGULAR-SPECTRAL DECOMPOSITION  
OF THE PRE-DETECTOR SIGNAL RECORDING

35

*Urvaev I. N.*

MOBILE ROBOT NAVIGATION  
BASED ON LASER RANGE METHODS

44

*Likhttsinder B. Ya., Bakay Yu. O.*  
ADAPTIVE COMPRESSION OF MEASURED DATA  
IN WIRELESS SENSOR NETWORKS 52

*Nefed'ev A. I., Nefed'ev D. I.*  
INDEPENDENT VERIFICATION OF THERMOELECTRIC  
COMPARING VOLTAGE CONVERTERS 58

### **TECHNOLOGY INSTRUMENTATION**

*Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Kondrashin V. I.,  
Antipenko V. V., Mel'nikov O. A., Karpanin O. V.*  
ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE ELECTROPHYSICAL  
PROPERTIES OF TRANSPARENT CONDUCTIVE COATINGS 64

### **MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS**

*Kramm M. N., Bezborodova O. E., Bodin O. N., Svetlov A. V.*  
DIGITAL HEART DOUBLE 73

*Baranov V. A., Pecherskaya E. A., Safronov M. I., Timokhina O. A.*  
INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR TELE-HEALTH  
MONITORING OF COVID-19 PATIENT'S CONDITION 85

# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.017

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-1

## НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К КЛАСТЕРИЗАЦИИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ КАК ОДНОГО ИЗ ЭТАПОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИДЕНТИФИКАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А. И. Лоскутов<sup>1</sup>, В. А. Клыков<sup>2</sup>, Е. А. Ряхова<sup>3</sup>, А. В. Столяров<sup>4</sup>, О. Л. Шестопалова<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Филиал «Восход» Московского авиационного института, г. Байконур, Казахстан

<sup>1,2</sup> vka@mil.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматриваются вопросы автоматизации процесса идентификации сложных технических объектов (СТО). Осуществлена постановка задачи автоматизации процесса идентификации сложных технических объектов на основе решения задачи кластеризации контролируемых параметров. Целью работы является применение нейросетевого метода кластеризации в автоматизации этапа процесса построения модели функционирования СТО. *Материалы и методы.* Представлен подход к кластеризации контролируемых параметров с использованием самоорганизующейся нейронной сети Кохонена. Новизна подхода заключается в применении известного нейросетевого метода кластеризации данных в новой области, а именно автоматизации процесса одного из этапов математического моделирования функционирования СТО. *Результаты.* Разработан алгоритм кластеризации контролируемых параметров по состояниям систем. Представлена обобщенная структурная схема системы автоматической идентификации с применением нейронной сети. Произведена оценка результатов моделирования на основе сопоставления полученных кластеров контролируемых параметров с данными вербальной модели СТО. *Вывод.* Анализ полученных результатов в ходе проведенного исследования показал, что применение нейронной сети при кластеризации контролируемых параметров возможно в качестве реализации одного из этапов автоматизации процесса идентификации СТО.

**Ключевые слова:** сложный технический объект, нейронная сеть, идентификация, кластеризация

**Для цитирования:** Лоскутов А. И., Клыков В. А., Ряхова Е. А., Столяров А. В., Шестопалова О. Л. Нейросетевой подход к кластеризации контролируемых параметров как одного из этапов автоматизации процесса идентификации сложных технических объектов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 5–16. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-1

## NEURAL NETWORK APPROACH TO CLUSTERIZATION OF CONTROLLED PARAMETERS AS ONE OF THE STAGES OF AUTOMATION OF THE IDENTIFICATION OF DIFFICULT TECHNICAL OBJECTS

A.I. Loskutov<sup>1</sup>, V.A. Klykov<sup>2</sup>, E.A. Ryakhova<sup>3</sup>, A.V. Stolyarov<sup>4</sup>, O.L. Shestopalova<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

<sup>5</sup> Voskhod branch Moscow Aviation Institute, Baykonur, Kazakhstan

<sup>1,2</sup> vka@mil.ru

**Abstract.** *Background.* The article discusses the issues of automation of the process of identification of complex technical objects (STO). The problem of automating the process of identification of complex technical objects is

formulated on the basis of solving the problem of clustering of controlled parameters. The aim of the work is to use the neural network clustering method in automating the stage of the process of building a model of the STO functioning. *Materials and methods.* An approach to the clustering of controlled parameters using a self-organizing neural network (NN) of Kohonen is presented. The novelty of the approach lies in the application of the well-known neural network method of data clustering in a new area, namely, the automation of the process of one of the stages of mathematical modeling of the STO functioning. *Results.* An algorithm for clustering the controlled parameters according to the states of systems has been developed. The generalized block diagram of the automatic identification system using the NN is presented. The results of modeling were evaluated based on the comparison of the obtained clusters of controlled parameters with the data of the verbal model of STO. *Conclusion.* The analysis of the results obtained in the course of the study showed that the use of a neural network in the clustering of controlled parameters is possible as an implementation of one of the stages of automation of the STO identification process.

**Keywords:** complex technical object, neural network, identification, clustering

**For citation:** Loskutov A.I., Klykov V.A., Rjahova E.A., Stoljarov A.V., Shestopalova O.L. Neural network approach to clusterization of controlled parameters as one of the stages of automation of the identification of difficult technical objects. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:5–16. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-1

### Введение

Известно [1], что под сложным техническим объектом понимается сложный управляемый объект, информация о функциональном состоянии которого передается в виде текущих значений измерительной информации в соответствующую систему управления. В настоящее время при проведении испытаний СТО в процессе их подготовки к применению по назначению в основном используются эвристические модели функционирования, содержащиеся в эксплуатационно-технической документации в неформализованном или слабо формализованном виде [1]. В то же время автоматизация процесса испытаний сложных технических объектов на базе ЭВМ невозможна без использования математических моделей функционирования СТО. В свою очередь, использование математических моделей позволяет широко применять возможности ЭВМ в контуре испытаний СТО. Однако построение рассматриваемого типа моделей связано с трудностями анализа всего множества состояний вследствие большого числа контролируемых параметров [2–4]. На практике это приводит к тому, что при проведении испытаний СТО возможно получить параметры (состояния), неучтенные на начальном этапе построения модели. Данный факт приводит к несоответствию модели и объекта испытаний и, как следствие, к увеличению различного рода затрат при повторном моделировании, а также ставит вопрос о целесообразности совершенствования существующего подхода в целом. Это создает предпосылки к необходимости автоматизации процесса построения модели функционирования СТО на основе использования эффективных математических инструментов.

### *Постановка задачи автоматизации процесса идентификации сложных технических объектов на основе решения задачи кластеризации контролируемых параметров*

Под идентификацией понимается процедура построения оптимальной (наилучшей) в определенном смысле математической модели (ее структуры и параметров) объекта по реализациям его наблюдаемых входных и выходных сигналов [4]. В общем случае с математической точки зрения задачей идентификации является нахождение оператора  $F_m$ , который бы в определенном смысле был близок оператору  $F$ , связывающему входные и выходные переменные объекта:

$$F_m \approx F. \quad (1)$$

Отметим, что «близость» согласно выражению (1) является весьма условной, а тождественное совпадение  $F$  и  $F_m$  вообще практически невозможно. Для количественной оценки расхождения операторов  $F$  и  $F_m$  используется скалярная функция  $\gamma$ , которая в общем виде может быть определена как [4]

$$\gamma = \gamma[Y, F_m(X)], \quad (2)$$

где  $Y$  – вектор наблюдаемых выходных переменных;  $X$  – вектор входных переменных.

Также известно [4], что процесс идентификации условно заключается в реализации основных этапов, а именно: определении функции выхода, решении задачи классификации над множеством контролируемых параметров и в конечном итоге определении математической структуры над базисными множествами, полученными как в результате решения задачи классификации, так и при подготовке исходных данных для проведения идентификации. Необходимо отметить, что время, затрачиваемое на реализацию данных этапов, с учетом применения эвристического подхода может изменяться в интервале от нескольких часов до нескольких дней, что при наличии ошибок в моделировании в некоторых случаях может привести к экспоненциальному росту временных затрат. Данное обстоятельство подчеркивает актуальность автоматизации этапов математического моделирования СТО. Исходя из этого задача классификации может быть переформатирована под задачу кластеризации. Результатом выполнения данной задачи является определение фактор-множества состояний объекта и множества видов его технических состояний (состояний, синтезированных в рамках создаваемой математической модели), которое находится во взаимно-однозначном отношении к первому. С формальной точки зрения реализация этапов автоматической идентификации может быть представлена в виде коммутативной диаграммы, представленной на рис. 1 [4].

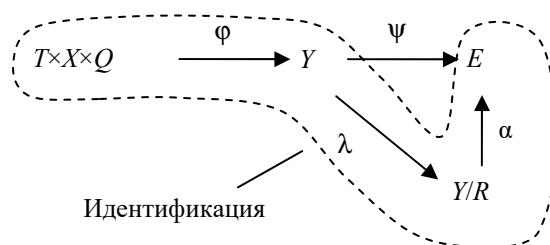


Рис. 1. Коммутативная диаграмма процесса идентификации аппаратуры сложных технических объектов:  $\phi: T \times X \times Q \rightarrow Y$  – отображение множества текущих состояний объекта в множество параметров;  $\lambda: Y \rightarrow Y/R$  – отображение, которое обозначает операцию факторизации, где  $R$  – бинарное отношение эквивалентности, обладающее свойствами рефлексивности, симметричности, транзитивности;  $\psi: Y \rightarrow E$  – отображение отнесения наблюдаемого состояния к одному из заданных видов технического состояния (в рамках создаваемой математической модели);  $\alpha: Y/R \rightarrow E$  – взаимно-однозначное отображение фактор-множества и видов технического состояния (в рамках создаваемой математической модели)

Необходимо отметить, что представленная коммутативная диаграмма не отражает процесс определения отношений над базисными множествами как конечный этап построения математической модели объекта испытаний.

Исходя из анализа коммутативной диаграммы, можно заметить, что кластеризация  $\psi$  контролируемых параметров, в свою очередь, есть реализация двух отображений, а именно: отображение  $\lambda$ , реализующее определение фактор-множества над полем контролируемых параметров, и отображение  $\alpha$ , реализующее взаимно-однозначное соответствие между полученным фактор-множеством и видами технического состояния (кластерами). Также необходимо отметить, что при идентификации кластеризация является одним из наиболее важных этапов вследствие того, что правильное решение данной задачи будет характеризовать степень соответствия между операторами  $F_m$  и  $F$  с точностью или разрешающей способностью, необходимой для решения целевых задач. В настоящее время существует несколько подходов к кластеризации и все они основаны на использовании специфичной для каждой предметной области дополнительной информации [5–7]. В свою очередь, необходимо отметить, что задача кластеризации требует своего решения не только на этапе моделирования, но и на всем периоде эксплуатации объекта.

Таким образом, постановка задачи автоматизации процесса идентификации СТО с математической точки зрения может быть представлена как задача минимизации временных затрат при построении функции (2) на основе кластеризации контролируемых параметров как одного из этапов построения математической модели.

Дано:

1) набор множеств  $M = \{Q, T, X, Y\}$ , определяющих исходные данные для построения математической структуры (модели объекта испытаний). Необходимо отметить, что исходный набор может быть изменен, учитывая то, как именно должен быть формализован СТО. Однако в самом общем случае данный набор должен включать в себя следующие множества: множество текущих состояний объекта испытаний  $Q$ , множество моментов времени  $T$ , множество управляющих воздействий  $X$ , множество контролируемых параметров  $Y$ ;

2)  $H = \langle h_1, \dots, h_n, \varphi \rangle$  – набор отношений над базисными множествами  $M$ ;

3) функция выхода, реализуемая с помощью отображения  $\varphi$ , заданного над множеством  $M$ ;

4) функция невязки  $\gamma$  (показатель идентификации), характеризующая несоответствие операторов  $F_m$  и  $F$ ;

5) способ  $K$  решения задачи кластеризации  $\psi$  на основе применения соответствующего математического инструмента;

6) показатель временных затрат  $Z_T$ . Следует отметить, что данный показатель также может быть представлен в общем виде и характеризовать другие виды затрат.

Требуется: определить оператора  $\tilde{F}_m \in F_m$  с минимально возможным уровнем затрат  $Z_T$  при условии достижения требуемого уровня показателя идентификации  $\gamma$  СТО на основе применения способа  $K$  при решении задачи кластеризации  $\psi$  ( $\psi = \lambda \circ \alpha$ ) контролируемых параметров. Формализованная постановка задачи может быть представлена следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda: Y \rightarrow Y/R; \\ \alpha: Y/R \rightarrow E; \end{array} \right\} \Rightarrow \psi(K) \Rightarrow Z_T \xrightarrow{\gamma \geq \gamma_{\text{треб}}} \min \left\{ \begin{array}{l} M = \{Q, T, X, Y\}; \\ \varphi: T \times X \times Q \rightarrow Y; \\ H = \langle h_1, \dots, h_n, \varphi \rangle; \\ \gamma = \gamma[Y, F_m(X)]. \end{array} \right. \quad (3)$$

Следует отметить, что наиболее перспективным подходом к кластеризации и в то же время наиболее эффективным с точки зрения практической реализации является способ, основанный на применении нейронных сетей (НС) [5–7]. В свою очередь необходимо отметить, что в работе не рассматривается вопрос автоматического определения отношений над базисными множествами, определяющих суть построения математической модели объекта испытаний. Решение данного вопроса является сложной научной задачей и является предметом отдельных исследований.

#### *Нейросетевой подход к кластеризации контролируемых параметров как одного из этапов автоматизации процесса идентификации сложных технических объектов*

В общем случае нейросетевые методы кластеризации являются развитием классических методов кластеризации. Для решения обозначенной задачи (3) на основе анализа свойств нейронных сетей выберем сеть типа *SOM* (*Self-organizing map* – самоорганизующейся сети Кохонена). В применении к диагностированию СТО НС Кохонена применяется для:

- 1) комбинаторного поиска решений;
- 2) распознавания посредством кластеризации.

Алгоритм построения самоорганизующейся НС представляет собой синтез отображения многомерного распределения точек на  $N$ -мерную решетку с регулярным или случайным соседством между узлами. При этом близким узлам на карте отвечают близкие вектора в исходном многомерном пространстве, т.е. сохраняется не только структура разбиения точек на кластеры, но и отношения локальной топологической близости между ними [8]. В общем случае сеть Кохонена – это однослойная сеть, построенная из нейронов типа *WTA* (*Winner Takes All* – победитель получает все). Структура такой нейронной сети представлена на рис. 2 [9].



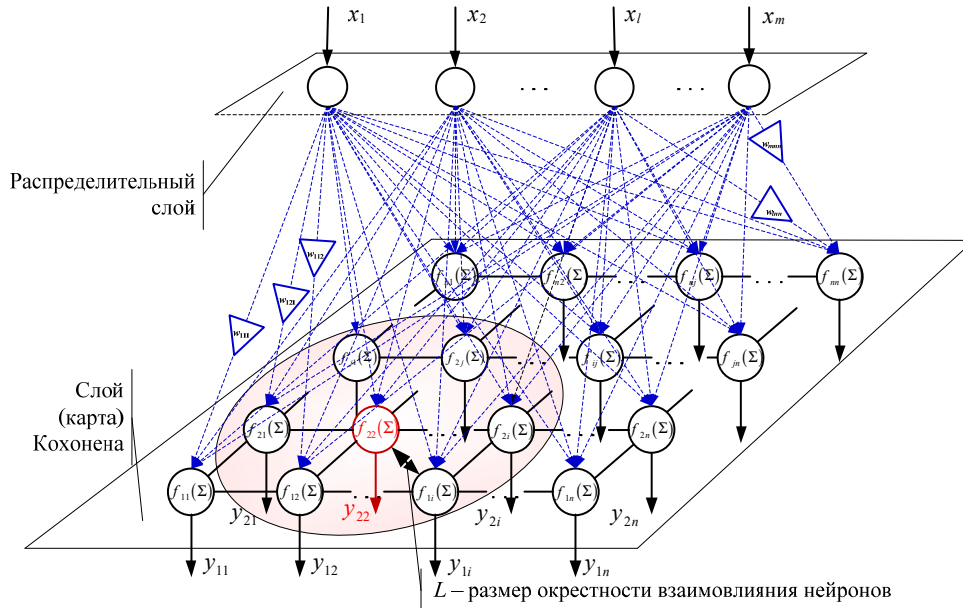


Рис. 2. Структура нейронной сети типа SOM

Алгоритм обучения заключается в выделении из всех нейронов слоя Кохонена лишь одного  $C$ -го нейрона, для которого взвешенная сумма входных сигналов максимальна:

$$C = \arg \max_i (x^T w_j). \quad (4)$$

В этом случае вследствие того, что сумма весов каждого нейрона  $\sum_i w_{ij}$  слоя Кохонена одинакова и  $x = 1$ , условие (4) эквивалентно условию

$$C = \arg \max_i \|x - w_i\|. \quad (5)$$

Таким образом, будет активирован только тот нейрон, вектор весов которого  $w$  наиболее близок к входному вектору  $x$ . Поскольку перед началом обучения неизвестно, какой именно нейрон будет активироваться при предъявлении сети конкретного входного вектора, сеть обучается без учителя, т.е. самообучается. Число нейронов в слое Кохонена должно соответствовать числу классов входных сигналов. Вводя потенциальную функцию – функцию расстояния  $f_{ij}$  («соседства») между  $i$ -м и  $j$ -м нейронами с местоположениями на решетке  $r_i$  и  $r_j$  соответственно, монотонно убывающую с увеличением расстояния между этими нейронами, в обобщенном виде можно записать следующий алгоритм коррекции весов:

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \alpha(k) f_{ij}(k) (x(k) - w_{ij}(k)), \quad (6)$$

где  $\alpha(k) \in (0,1]$  – изменяющийся во времени коэффициент усиления ( $\alpha = 1$  на первой итерации, постепенно уменьшая в процессе обучения до нуля);  $f_{ij}(k)$  – монотонно убывающая функция расстояния:

$$f_{ij}(k) = f(\|r_i - r_j\|, k) = f(d, k) = f(d, L), \quad (7)$$

где  $r_i$  и  $r_j$  – векторы, определяющие положение нейронов  $i$  и  $j$  в решетке.

Параметр усиления  $\alpha$  и радиус взаимодействия  $L$  изменяются с каждой  $k$ -й итерацией в соответствии с выражениями

$$\alpha(k) = \alpha(0) \left[ \frac{\alpha_{\min}}{\alpha(0)} \right]^{\frac{k}{k_{\max}}}, \quad L(k) = L(0) \left[ \frac{L_{\min}}{L(0)} \right]^{\frac{k}{k_{\max}}}, \quad (8)$$

где  $\alpha(0) \approx 0,8$ ;  $\alpha_{\max} \ll 1$ ;  $\sigma(0) \approx 0,2$ ;  $\alpha_{\min} = 0,5$  – параметры крутизны функции  $f_{ij}$ ;  $k_{\max}$  – максимально задаваемое число итераций обучения НС.

Х. Ритгером и К. Шультемом в работе [10] доказано, что обучение НС в соответствии с выражением (6) эквивалентно градиентному методу обучения, основанному на минимизации целевой функции

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i,j,k} f_{ij}(k) (x_j(k) - w_{ij}(k))^2. \quad (9)$$

В принятой метрике  $d = \|r_i - r_j\|$  функция  $f_{ij}(k)$  с ростом числа итераций  $k$  стремится к нулю. Вместо отсчетов  $k$  можно использовать параметр расстояния  $L$ , задающий величину области «соседства» и уменьшающийся с каждой итерацией  $k$  до нуля. Выбор функции  $f_{ij}(L)$  влияет на величины весов всех нейронов в слое Кохонена, и для нейрона-победителя  $C$

$$f_c(\|r_i - r_j\|) = f_c(0) = 1. \quad (10)$$

В случае евклидовой метрики:

$$d = \sum_k (r_{ik} - r_{jk})^2, \quad (11)$$

где  $r_{ik}$  и  $r_{jk}$  – координаты  $i$ -го и  $j$ -го нейронов двумерной регулярной решетки. Наиболее часто используемые функции соседства представлены в работе [10].

Применительно к рассматриваемому в работе подходу размерность пространства входного вектора будет определяться размерностью телеметрического образа  $Y_{ij} = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}]^T$  ( $j = 1, \dots, m$ ), полученного в результате определения функции выхода  $\phi$ . Таким образом, отклик сети на входной вектор понимается как «нейрон-победитель», расстояние до которого от  $Y_{ij}$  минимально:

$$d(Y, W_j) = \min_{1 \leq i \leq n} d(Y, W_i), \quad (12)$$

где  $j$  – номер «нейрона-победителя» НС.

При обучении НС входные значения необходимо нормировать (нормирование входных данных положительным образом сказывается на скорости обучения сети), например, согласно работе [9].

В общем случае обучение самоорганизующейся сети Кохонена происходит до момента, когда выполняется любое из следующих условий [9]:

- 1) достигается максимальное число эпох;
- 2) достигается малая величина функционала ошибки, вычисляемая по формуле [9]

$$E = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q \|Y_i - W_{Y_i}\|^2, \quad (13)$$

где  $W_{Y_i}$  – вектор весов нейрона-победителя при предъявлении входного вектора  $Y_i$ ;  $Q$  – размер обучающей выборки;

- 3) превышено максимальное время обучения.

Процесс обучения самоорганизующейся сети Кохонена состоит из циклического повторения ряда шагов:

- 1) подача исходных данных на вход НС;
- 2) нахождение выхода каждого нейрона;
- 3) определение «нейрона-победителя»;
- 4) корректировка весов «выигравшего» нейрона по правилу Кохонена [9, 10]:

$$w_i^{k+1} = w_i^k + \eta_i^k [y - w_i^k], \quad (14)$$

где  $y$  – входной вектор НС;  $k$  – номер цикла обучения НС;  $\eta_i^k$  – коэффициент скорости обучения  $i$ -го нейрона в  $k$ -м цикле обучения.

Таким образом, обобщенная схема автоматизации процесса идентификации СТО на основе решения задачи кластеризации может быть представлена следующим образом (рис. 3).

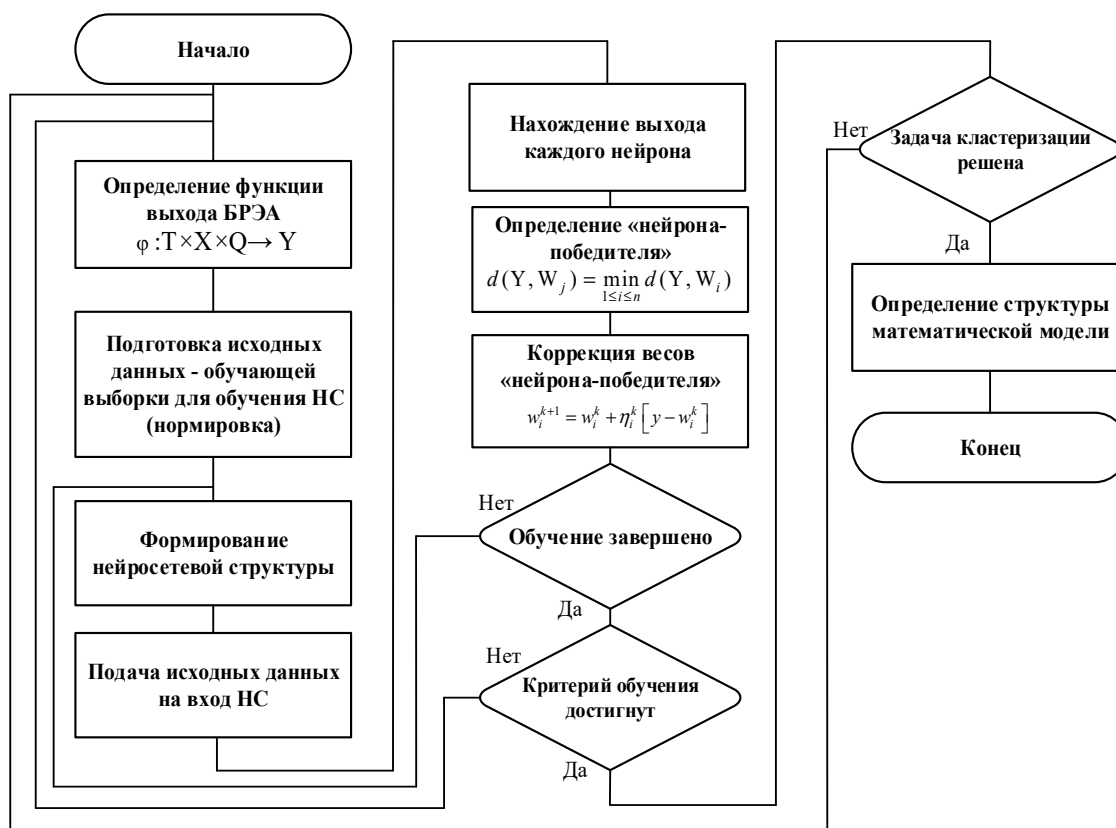


Рис. 3. Обобщенная блок-схема алгоритма обучения нейронной сети при решении задачи кластеризации

Очевидно, что представленный подход позволяет минимизировать временные затраты, а также с требуемой точностью решить задачу кластеризации как одного из этапов автоматизации процесса идентификации СТО. Рассмотрим возможность реализации нейросетевого подхода при кластеризации контролируемых параметров на этапе процесса идентификации СТО.

#### ***Пример нейросетевого подхода при кластеризации контролируемых параметров бортовой аппаратуры сложных технических объектов***

В качестве исходных данных рассмотрим параметры СТО, в роли которого выступает радиопередающее устройство (РПУ) РПТ111. Данное устройство предназначено для формирования частотно-манипулированного сигнала дециметрового диапазона волн с переключающимися информативностями и переключаемой выходной мощностью. Прибор РПТ111 может эксплуатироваться в составе аппаратуры герметизированных и негерметизированных приборных отсеков космических аппаратов (КА), разгонных блоков (РБ). Данное РПУ разработано и эксплуатируется в составе РБ «Бриз-М», «Фрегат», КА «Фобос-Грунт» и др.

Передачик имеет выходные цепи контрольных сигналов: ТМА – мощность падающей волны, ТМОТР – мощность отраженной волны. Также при проведении испытаний РБ «Фрегат» параметром передатчика, подлежащим контролю, является ТМИ – контроль источника питания передатчика. Таким образом, размерность телеметрического образа РПУ РПТ111 равна трем. На основе рассмотренного выше алгоритма обучения представим пример реализации нейросетевого подхода к кластеризации контролируемых параметров как одного из этапов автоматизации процесса идентификации СТО. Необходимо отметить, что для простоты реализации нейросетевого подхода будут рассмотрены параметры только исправно функционирующей аппаратуры:

1. Определим функцию выхода  $\varphi$  радиопередающего устройства РПТ111. Данный этап связан с проведением большого числа экспериментов в лабораторных и натуральных условиях.

В число таких экспериментов входят также наблюдение за реально функционирующим объектом. В результате анализа литературы были получены значения функции выхода РПУ РПТ111 на 1500 элементов (векторов параметров).

2. На основании значений функции выхода  $\varphi$  радиопередающего устройства РПТ111 синтезируем обучающую выборку на 1500 элементов для обучения самоорганизующейся сети Кохонена. С целью обучения используем линейную нормировку при подготовке исходных данных. Фрагмент обучающей выборки представлен в табл. 2.

Таблица 2

Пример реализации обучающей выборки

Номер	ТМОТР	ТМА	ТМИ
1	0,768444	0,538603	0,637808
2	0,879992	0,517149	0,25121
3	0,776979	0,477883	0,383741
4	0,756759	0,294193	0,754547
5	0,847415	0,300105	0,721999
6	0,715172	0,212177	0,460506
7	0,699155	0,441099	0,396254
8	0,714076	0,422326	0,618255
9	0,82615	0,417174	0,700565
10	0,820944	0,49787	0,835965
...	...	...	...
1498	0,639071	0,244369	0,485797
1499	0,642749	0,313239	0,523842
1500	0,791009	0,380537	0,845319

3. Сформируем нейросетевую структуру для решения задачи кластеризации в пакете расширения Neural Network Toolbox системы MATLAB R2017a. Стандартная сеть, которая используется по умолчанию для кластеризации данных, является самоорганизующейся сетью Кохонена размером десять на десять ячеек. Размерность входного вектора равна размерности телеметрического образа. На рис. 4 приведена топология сформированной нейронной сети.

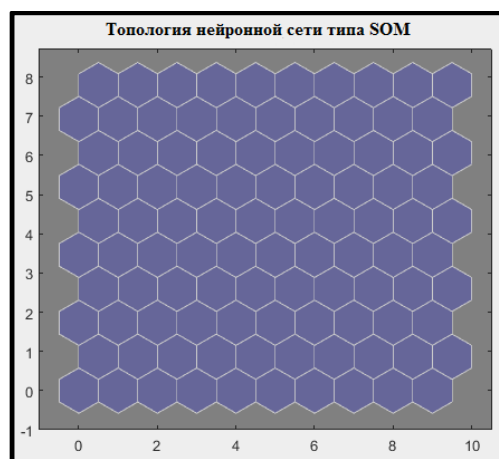


Рис. 4. Топология нейронной сети типа SOM

Из анализа рис. 4 видно, что топология карты является гексагональной, каждый из шестиугольников представляет собой нейрон. Карта имеет размеры 10 на 10 (содержит 100 нейронов). Каждый входной вектор содержит три элемента, поэтому входное пространство трехмерное. Карта отображает трехмерное пространство в двухмерное.

4. Произведем обучение нейросетевой структуры на основе сформированной в пункте 2 обучающей выборки. Оценим результаты в виде графика весов, называемого компонентной плоскостью – *Component Planes* и графика положения весов – *SOM Weight Positions*. На графике компонентной плоскости более темные цвета представляют большие веса. Одинаковыми

цветами отмечаются близкие веса. На рис. 5 видно, что состояния резко отличаются по первому и второму входам (параметры ТМИ и ТМА) и близки по третьему входу (параметр ТМОТР).

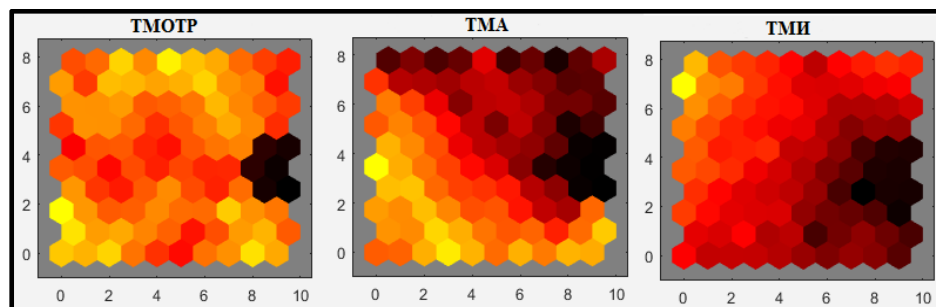


Рис. 5. Компонентные плоскости телеметрического образа РПУ РПТ111

График положения весов (рис. 6) показывает зелеными точками координаты входных векторов, определяемые по первым двум компонентам. Аналогично синими точками отображаются координаты векторов первых двух весов нейронов. Соседние нейроны соединяются красными линиями.

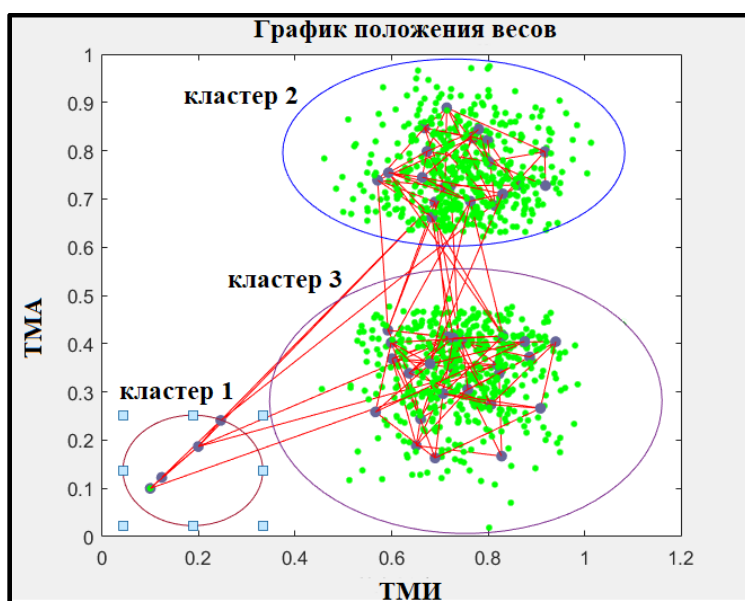


Рис. 6. График положения весов

Необходимо отметить, что для удобства восприятия полученных результатов график представлен в двухмерном пространстве. Удаленность объектов каждого из кластера соответствует требуемому значению качества кластеризации, обеспечив  $\gamma_{\text{треб}}$  при  $\tilde{F}_m \in F_m$ . В свою очередь, анализ данных показал, что нейронная сеть сгруппировала телеметрический образ РПУ РПТ111 на три кластера. В табл. 3 представлены сформированные кластеры по диапазонам параметров передатчика.

Таблица 3

Сформированные кластеры в результате анализа НС телеметрического образа РПУ РПТ111

Кластер	ТМА	ТМОТР	ТМИ
1 ( $e_1$ )	0В	0В	0В
2 ( $e_2$ )	$4 \pm 1В$	Не более 0,5В	$3,8 \pm 0,8В$
3 ( $e_3$ )	$2 \pm 0,8В$	Не более 0,5В	$3,8 \pm 0,8В$

Как видно из табл. 3, сформированным кластерам соответствуют состояния по режимам работы передатчика и состоянию, когда РПТ111 выключен. В свою очередь время, затраченное на получение результата, находилось в пределах 30–40 мин, необходимо отметить, что основное время было потрачено на подготовку исходных данных ( $T_{\text{исх дан}}$ ), а не кластеризацию ( $T_{\text{кл}}$ ), т.е.  $T_{\text{рез}} = T_{\text{исх дан}} + T_{\text{кл}}$ ,  $T_{\text{исх дан}} \gg T_{\text{кл}}$ . На рис. 7 представлено соотношение временных затрат на решение задачи классификации при эвристическом подходе (с учетом наличия полной вербальной модели процесса функционирования) и решение задачи кластеризации на основе применения НС, обеспечив минимальное значение  $Z_T$ .

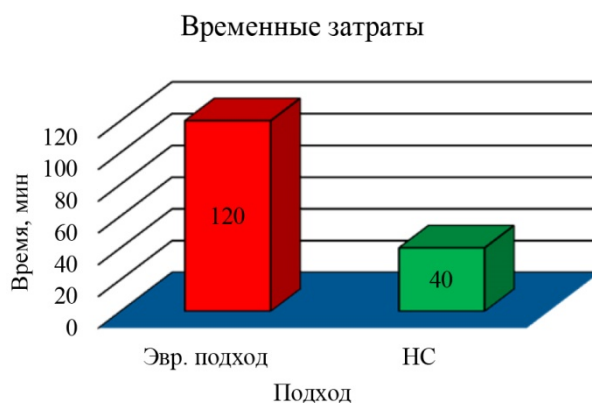


Рис. 7. Соотношение временных затрат при решении задачи классификации (эвристический подход) и кластеризации (НС)

Приведенный в работе пример кластеризации контролируемых параметров является наиболее простым примером реализации одного из этапов автоматизации процесса идентификации СТО на основе применения нейросетевого подхода ввиду небольшой размерности входного вектора. Проведенная кластеризация может быть без труда осуществлена и без применения НС. Однако на практике может возникнуть ситуация, когда количество контролируемых параметров (размерность входного вектора) будет на один или два порядка выше, тогда представленный в работе подход может быть реализован для кластеризации контролируемых параметров как одного из этапов автоматизации процесса идентификации СТО.

### Заключение

Использование математических моделей позволяет широко использовать возможности ЭВМ в контуре испытаний СТО. Однако построение рассматриваемого типа моделей связано с определенными трудностями, одной из которых является так называемое «проклятие размерности» вследствие большого числа контролируемых параметров. В свою очередь ошибки, допущенные при проведении математического моделирования, могут иметь катастрофические последствия в дальнейшем. Для предотвращения негативных последствий «ручного» математического моделирования возникает необходимость автоматизации данного процесса. В свою очередь идентификация (процесс построения математической модели) СТО заключается в последовательном решении нескольких задач, одной из которых является задача классификации. Применительно к автоматизации процесса идентификации задача классификации должна быть переформатирована под задачу кластеризации. Анализ полученных результатов в ходе проведенного исследования показал, что применение нейронной сети при кластеризации контролируемых параметров возможно в качестве реализации одного из этапов автоматизации процесса идентификации СТО.

### Список литературы

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов : монография. М. : Наука, 2006. 408 с. ISBN 5-02-033789-7.

2. Takahashi M., Kosaka R., Nanba R. A Study of Fault Tree Analysis for Control Program in Space System // 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration : proc. 2015. P. 301–306.
3. Талалаев, А. А., Фраленко В. П., Хачумов В. М. Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2015. № 3. С. 21–43.
4. Дмитриев А. К. Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем. СПб. : ВИКУ им А. Ф. Можайского, 1999. 174 с.
5. Сидоревич А. Н. Алгоритмы кластеризации данных с использованием нейронных сетей // Статьи факультета радиофизики и компьютерных технологий. 2005. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/7648> (дата обращения: 18.09.2020).
6. Сырямкин В. И., Горбачев С. В., Сунцов С. Б. Адаптивные нейросетевые алгоритмы диагностики материалов, оборудования и радиоэлектронной аппаратуры. Saarbrucken : LAMBERT Academic Publishing, 2013. 269 с.
7. Zohrer M., Pernkopf F. General stochastic networks for classification. In NIPS'2014. 2014.
8. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. 2-е изд., испр. М. : Вильямс, 2006. 1104 с.
9. Горбаченко В. И. Нейроинформатика : конспект лекций. – Пенза : Пенз. гос. пед. ун-т им. В. Г. Белинского, 2011. 81 с.
10. Ritter H., Schulden K. On the stationary state of the Kohonen self-organizing sensory mapping // Biological Cybernetics. 1986. Vol. 54. P. 234–249.

### References

1. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov: monografiya = Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects: monograph*. Moscow: Nauka, 2006:408. ISBN 5-02-033789-7. (In Russ.)
2. Takahashi M., Kosaka R., Nanba R. A Study of Fault Tree Analysis for Control Program in Space System. *2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration: proc.* 2015:301–306.
3. Talalaev, A.A., Fralenko V.P., Khachumov V.M. Overview of standards and the concept of building spacecraft monitoring, control and diagnostics tools. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Software systems: Theory and applications*. 2015;3:21–43. (In Russ.)
4. Dmitriev A.K. *Modeli i metody analiza tekhnicheskogo sostoyaniya bortovykh sistem = Models and methods for analyzing the technical condition of on-board systems*. Saint-Petersburg: VIKU im A. F. Mozhayskogo, 1999:174. (In Russ.)
5. Sidorevich A.N. Data clustering algorithms using neural networks. *Stat'i fakul'teta radiofiziki i kompyuternykh tekhnologiy = Articles of the Faculty of Radiophysics and Computer Technology*. 2005. Available at: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/7648> (accessed 18.09.2020). (In Russ.)
6. Syryamkin V.I., Gorbachev S.V., Suntsov S.B. *Adaptivnye neyrosetevye algoritmy diagnostiki materialov, oborudovaniya i radioelektronnoy apparatury = Adaptive neural network algorithms for diagnostics of materials, equipment and radio-electronic equipment*. Saarbrucken: LAMBERT Academic Publishing, 2013:269. (In Russ.)
7. Zohrer M., Pernkopf F. *General stochastic networks for classification*. In NIPS'2014. 2014.
8. Khaykin S. *Neyronnye seti. Polnyy kurs. 2-e izd., ispr. = Neural networks. Full course. 2nd ed., revised*. Moscow: Vil'yams, 2006:1104. (In Russ.)
9. Gorbachenko V.I. *Neyroinformatika: konspekt lektsiy = Neuroinformatics: lecture notes*. Penza: Penz. gos. ped. un-t im. V. G. Belinskogo, 2011:81. (In Russ.)
10. Ritter H., Schulden K. *On the stationary state of the Kohonen self-organizing sensory mapping*. *Biological Cybernetics*. 1986;54:234–249.

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Андрей Иванович Лоскутов

доктор технических наук, профессор,  
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, professor,  
head of sub-department of telemetry systems,  
complex processing and protection of information,  
Military Space Academy  
named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Владимир Алексеевич Клык**

кандидат технических наук, преподаватель,  
кафедра 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

**Екатерина Александровна Ряхова**

адъюнкт,  
кафедра 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

**Андрей Владимирович Столяров**

адъюнкт,  
кафедра 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

**Ольга Львовна Шестопалова**

кандидат технических наук, доцент,  
декан факультета «Испытание летательных  
аппаратов»,  
филиал «Восход»  
Московского авиационного института  
(Казахстан, г. Байконур, ул. Гагарина, 5)  
E-mail: vka@mil.ru

**Vladimir A. Klykov**

Candidate of technical sciences, teacher,  
sub-department of telemetry systems,  
complex processing and protection of information,  
Military Space Academy  
named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Ekaterina A. Ryakhova**

Adjunct,  
sub-department of telemetry systems,  
complex processing and protection of information,  
Military Space Academy  
named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Andrey V. Stolyarov**

Adjunct,  
sub-department of telemetry systems,  
complex processing and protection of information,  
Military Space Academy  
named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Olga L. Shestopalova**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
dean of faculty "Test of aircraft",  
Voskhod branch Moscow Aviation Institute  
(5 Gagarina street, Baikonur, Kazakhstan)



УДК 681.586.2

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-2

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА СИСТЕМЫ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ

И. Н. Чебурахин<sup>1</sup>, И. В. Ползунов<sup>2</sup>, А. А. Трофимов<sup>3</sup>,  
Д. А. Ярославцева<sup>4</sup>, М. В. Тюрин<sup>5</sup>

<sup>1,2,4,5</sup> Научно-исследовательский институт физических измерений, г. Пенза, Россия

<sup>3</sup> Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> info@niifi.ru, <sup>3</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>4</sup> levik\_92@mail.ru, <sup>5</sup> preobrazovatel@niifi.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В условиях быстро развивающихся информационно-измерительных технологий необходимо оперативно и наиболее точно подходить к процессу проектирования и разработки современной датчиково-преобразующей аппаратуры (ДПА). Определение метода измерения того или иного параметра является актуальной и не тривиальной задачей. Использование современных методов компьютерного моделирования позволяет предварительно оценить работоспособность ДПА, отсеять нерациональные варианты и приступить к разработке будущего изделия. Цель компьютерного моделирования тензорезистивного датчика абсолютного давления – выбор оптимальных конструктивных решений для дальнейшего проектирования системы абсолютного давления. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования применялось компьютерное моделирование с использованием программного обеспечения SolidWorks с модулем Simulation, что позволило избежать дорогостоящих и длительных циклов проектирования и получить приемлемые схемно-конструктивные решения для дальнейшего изготовления опытных образцов тензорезистивных датчиков давления и системы на их основе. *Результаты.* В результате компьютерного моделирования выбраны конструктивные параметры чувствительного элемента при воздействии номинального давления 1,6 кгс/см<sup>2</sup>, определены перемещения мембраны и балки при приложении к штоку сосредоточенной нагрузки 2,1 кг в зависимости от значений допусков геометрических размеров чувствительного элемента.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, тензорезистивный датчик абсолютного давления, система абсолютного давления

**Для цитирования:** Чебурахин И. Н., Ползунов И. В., Трофимов А. А., Ярославцева Д. А., Тюрин М. В. Компьютерное моделирование тензорезистивного датчика системы абсолютного давления // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 17–24. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-2

## COMPUTER SIMULATION OF A STRAIN-RESISTIVE SENSOR OF AN ABSOLUTE PRESSURE SYSTEM

I.N. Cheburakhin<sup>1</sup>, I.V. Polzunov<sup>2</sup>, A.A. Trofimov<sup>3</sup>,  
D.A. Yaroslavtseva<sup>4</sup>, M.V. Tyurin<sup>5</sup>

<sup>1,2,4,5</sup> Research and Development Institute for Physical Measurements, Penza, Russia

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

<sup>1,2</sup> info@niifi.ru, <sup>3</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>4</sup> levik\_92@mail.ru, <sup>5</sup> preobrazovatel@niifi.ru

**Abstract.** *Background.* In the conditions of rapidly developing information-measuring technologies, it is necessary to quickly and most accurately approach the design and development process of modern sensor-converting equipment (SCE). Determination of a method for measuring a particular parameter is an urgent and not a trivial task. The use of modern methods of computer modeling makes it possible to preliminarily assess the operability of the SCE, cut off irrational options and start developing a future product. The purpose of computer simulation of a strain-gauge absolute pressure sensor is the selection of optimal design solutions for further design of an absolute pressure system. *Materials and methods.* As a research method, computer modeling was applied using the SolidWorks software with the Simulation module, which made it possible to avoid expensive and lengthy design cycles and obtain acceptable schematic and design solutions for the further manufacture of prototypes of strain-gauge pressure sensors and systems based on them. *Results.* As a result of computer modeling, the design parameters of the sensitive element under the influence of a nominal pressure of 1.6 kgf/cm<sup>2</sup> were selected, the displacements of the membrane and the beam were determined when a concentrated load of 2.1 kg was applied to the rod, depending on the tolerance values of the geometric dimensions of the sensitive element.

**Keywords:** computer modeling, strain-gauge absolute pressure sensor, absolute pressure system

**For citation:** Cheburakhin I.N., Polzunov I.V., Trofimov A.A., Yaroslavtseva D.A., Tyurin M.V. Computer simulation of a strain-resistive sensor of an absolute pressure system. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:17–24. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-2

### *Введение*

Датчики физических величин являются важнейшими элементами информационно-измерительных систем, систем контроля, мониторинга, управления и технической диагностики [1–4].

В последнее время в связи с интенсивным развитием отраслей техники, таких как авиационная, космическая, автомобильная и другие, была выявлена актуальная задача повышения точности измерения тензорезистивных датчиков абсолютного давления.

Основным узлом тензорезистивного металлопленочного датчика абсолютного давления, определяющим технические характеристики, является чувствительный элемент [5]. Он представляет собой, как правило, воспринимающий давление элемент (мембрана с балкой) из упругого материала, на котором сформирована тензочувствительная схема, состоящая из тензорезисторов, соединенных в мостовую схему.

В связи с превалирующим значением чувствительного элемента особое внимание должно быть уделено его конструкции. При этом основной задачей является максимальная минимизация температурных и механических воздействий в жестких условиях эксплуатации, что выявляет необходимость учета взаимосвязи температурных и механических воздействий, проявляющихся во взаимном влиянии этих воздействий друг на друга. Например, воздействие температуры приводит к появлению в зонах размещения тензорезисторов не только температурного поля, но и поля температурных деформаций, а механические воздействия, в частности вибрации, помимо механических деформаций вызывают дополнительное изменение температуры упругого элемента.

Требование к конструктивному исполнению, в части выбора конфигурации и геометрического исполнения элементов конструкции датчика, может быть сформулировано как обеспечение идентичности температурных полей и полей температурных деформаций в зонах установки тензорезисторов на мембрану. Решение вопроса обеспечения идентичности температурных полей и полей температурных деформаций в зонах установки тензорезисторов на мембране для каждой выбранной конструкции должно осуществляться индивидуально, в зависимости от конструктивных особенностей. На основании изложенного проведем компьютерное моделирование [6, 7] конструкции мембраны тензорезистивного датчика абсолютного давления, выполненного по тонкопленочной технологии.

### *Основная часть*

Задачами компьютерного моделирования являются:

1. Определение значения перемещения балки, распределение деформации по рабочей поверхности балки под действием сосредоточенной нагрузки на шток с учетом значений допусков геометрических размеров.

2. Определение значения перемещения мембраны под действием номинального давления с учетом значений допусков геометрических размеров и разброса значения модуля упругости сплава 36НХТЮ.

3. Определение значения перемещения и распределение деформации на поверхности балки под воздействием на мембрану номинального давления с учетом значений допусков геометрических размеров и разброса значения модуля упругости, сплава 36НХТЮ.

4. Моделирование влияния момента затяжки винтов на перемещение балки.

5. Определение значений температуры на тензорезисторах при расстояниях 800 и 500 мкм между ними с учетом времени непрерывной работы датчика 16 ч при температуре окружающей среды +25 °С для балки из сплава 36НХТЮ.

Для реализации поставленных задач были созданы компьютерные модели балки, мембранного блока чувствительного элемента. Модель построена в программной среде SolidWorks, а самый прочностной расчет осуществлялся методом конечных элементов с применением модуля Simulation [8]. Модель мембранного блока представляет собой сварную конструкцию мембраны, подушки и балки (рис. 1); модель чувствительного элемента представляет собой сварную конструкцию мембранного блока и балки с расположенной на ней тензорезистивной схемой (рис. 2).

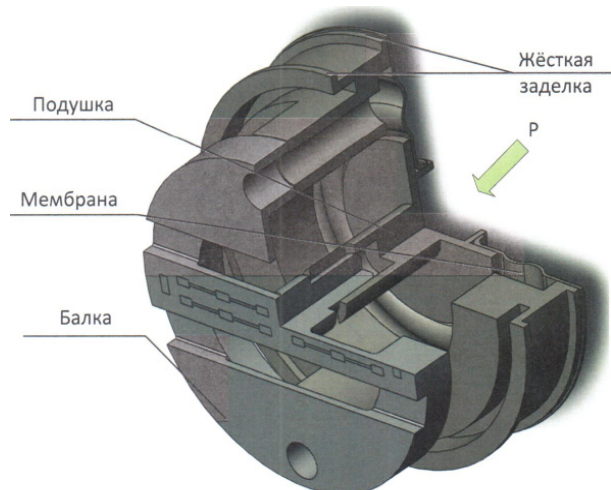


Рис. 1. Мембранный блок, представляющий собой сварную конструкцию мембраны, подушки и балки

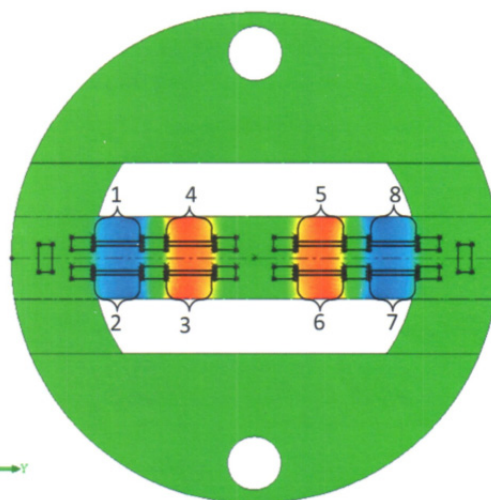


Рис. 2. Балка с тензорезистивной измерительной схемой (1–8 тензорезисторы)

Для проведения расчетов методом конечных элементов необходимо выполнение граничных условий, задаваемых исходя из принципа работы датчика.

Граничные условия для определения значения перемещения балки и распределение деформации на ее поверхности изображены на рис. 3, а. Данная схема граничных условий удовлетворяет требованиям первой задачи.

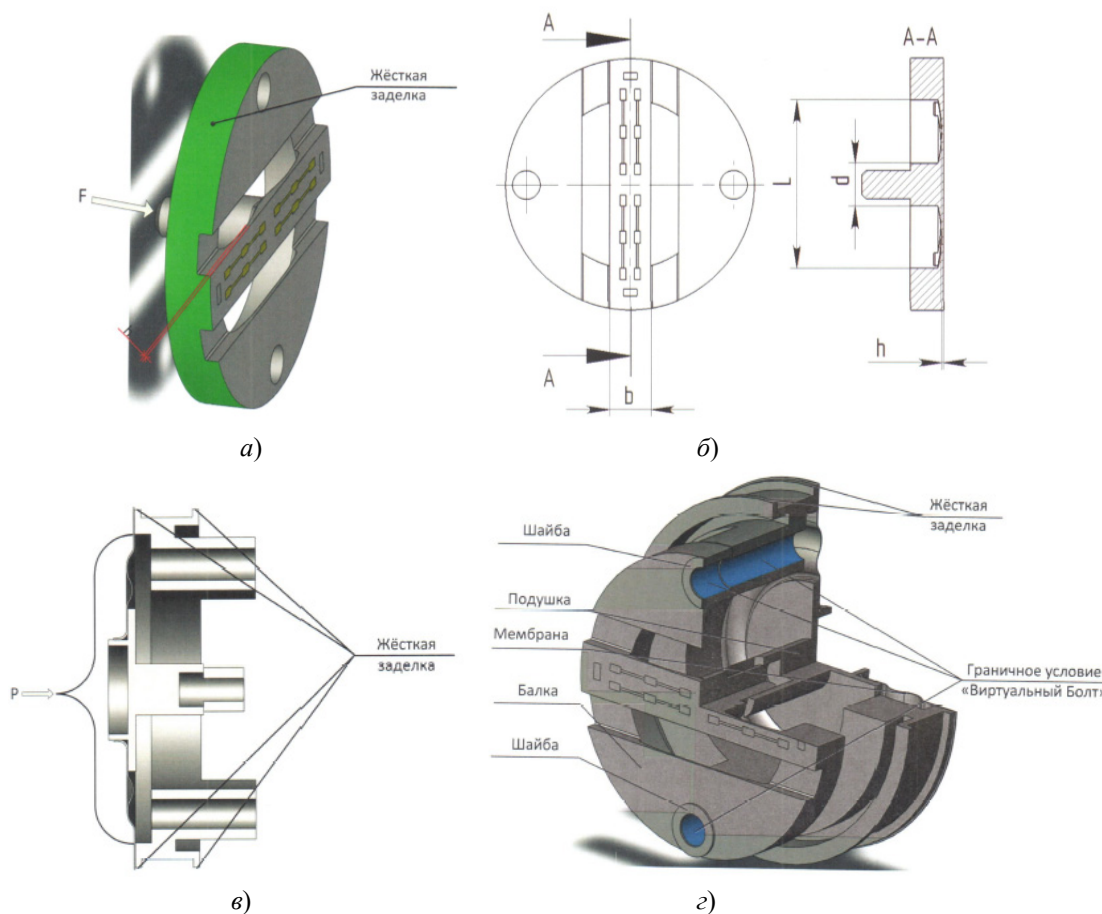


Рис. 3: Схемы: а – граничных условий для определения значения перемещения балки и распределения деформации на ее поверхности; б – конструктивных элементов балки, непосредственно влияющих на прогиб; в – граничных условий для определения перемещения мембраны под действием номинального давления; г – граничных условий для оценки влияния момента затяжки винтов на прогиб балки

Граничные условия для определения перемещения мембраны под действием номинального давления изображены на рис. 3,в. Данная схема граничных условий удовлетворяет требованиям второй задачи.

Граничные условия для определения перемещения и распределение деформации на рабочей поверхности балки под действием на мембрану номинального давления изображены на рис. 1. Данная схема граничных условий удовлетворяет требованиям третьей задачи.

Граничные условия для оценки влияния момента затяжки ( $0,2 \pm 0,04 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) винтов на прогиб балки, будут использоваться согласно схеме, изображенной на рис. 3,г.

В результате расчетов были определены перемещения балки, имеющей различную толщину рабочей части (размер  $h$ , рис. 3,б). Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения перемещения балки под действием сосредоточенной нагрузки

$h$ , мкм	Действующая сосредоточенная нагрузка, Н	Перемещение балки, мкм
135	21	108
155		85
160		79
165		75

На рис. 2 изображена балка с тензорезистивной измерительной схемой, разбитой на 8 областей, показывающей качественную характеристику распределения относительной деформации по оси  $Y$ . Значения относительной деформации в каждой области, в зависимости от толщины  $h$ , приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения относительной деформации оси  $Y$  при воздействии на шток сосредоточенной нагрузки 2,1 кг

Области деформации	Относительная деформация в зависимости от минимальной толщины рабочей части балки ( $h$ )			
	$h = 135 \text{ мкм}$	$h = 155 \text{ мкм}$	$h = 160 \text{ мкм}$	$h = 165 \text{ мкм}$
1	$-2,57 \cdot 10^{-3}$	$-2,14 \cdot 10^{-3}$	$-1,98 \cdot 10^{-3}$	$-1,89 \cdot 10^{-3}$
2	$-2,55 \cdot 10^{-3}$	$-2,06 \cdot 10^{-3}$	$-1,97 \cdot 10^{-3}$	$-1,89 \cdot 10^{-3}$
3	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-3}$
4	$2,56 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$
5	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$
6	$2,56 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$
7	$-2,54 \cdot 10^{-3}$	$-2,12 \cdot 10^{-3}$	$-1,98 \cdot 10^{-3}$	$-1,89 \cdot 10^{-3}$
8	$-2,54 \cdot 10^{-3}$	$-2,09 \cdot 10^{-3}$	$-1,98 \cdot 10^{-3}$	$-1,90 \cdot 10^{-3}$

В результате расчетов были определены перемещения мембраны под действием номинального давления в зависимости от исполнения мембраны с учетом допусков геометрических размеров и разбросом значения модуля упругости сплава 36НХТЮ. Результаты моделирования мембранного блока сведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения величин перемещений мембраны под действием номинального давления 0,16 МПа

Толщина мембраны, мкм	Модуль упругости, ГПа	Перемещение мембраны, мкм
100	180	108
	200	95
80	180	163
	200	140

При решении третьей задачи были получены значения перемещения и распределения относительной деформации на рабочей поверхности балки с учетом допусков геометрических

размеров и разбросом значения модуля упругости сплава 36НХТЮ. Моделирование проводилось при воздействии на мембрану номинального давления 0,16 МПа. Результаты моделирования с полученным значением перемещения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения величины перемещений балки под действием номинального давления 0,16 МПа

Толщина мембраны, мкм	Толщина рабочей части балки ( $h$ ), мкм	Модуль упругости, ГПа	Перемещение балки, мкм
100	155	200	49
		180	54
	135	200	55
		180	60
80	155	200	60
		180	66
	135	200	68
		180	75

В табл. 5 и 6 приведены значения относительной деформации по оси  $Z$  в зависимости от толщины мембраны и рабочей части балки.

Таблица 5

Значения относительной деформации по оси  $Y$  и толщиной мембраны 100 мкм под действием номинального давления 0,16 МПа

Области деформации	Относительная деформация в зависимости от минимальной толщины рабочей части балки ( $h$ ) с учетом разброса значения модуля упругости, сплава 36НХТЮ, $\times 10^{-3}$			
	$h = 135$ мкм		$h = 155$ мкм	
	Модуль упругости, ГПа		Модуль упругости, ГПа	
	200	180	200	180
1	-1,26	-1,40	-1,20	-1,33
2	-1,27	-1,41	-1,18	-1,35
3	1,29	1,43	1,20	1,33
4	1,28	1,43	1,20	1,34
5	1,28	1,42	1,19	1,34
6	1,28	1,43	1,20	1,34
7	-1,27	-1,41	-1,20	-1,33
8	-1,26	-1,40	-1,22	-1,31

Таблица 6

Значения относительной деформации по оси  $Y$  и толщиной мембраны 80 мкм под действием номинального давления 0,16 МПа

Области деформации	Относительная деформация в зависимости от минимальной толщины рабочей части балки ( $h$ ) с учетом разброса значения модуля упругости, сплава 36НХТЮ, $\times 10^{-3}$			
	$h = 135$ мкм		$h = 155$ мкм	
	Модуль упругости, ГПа		Модуль упругости, ГПа	
	200	180	200	180
1	-1,57	-1,73	-1,45	-1,62
2	-1,56	-1,73	-1,42	-1,58
3	1,58	1,76	1,45	1,61
4	1,58	1,76	1,45	1,61
5	1,58	1,76	1,42	1,58
6	1,58	1,76	1,45	1,62
7	-1,55	-1,74	-1,44	-1,60
8	-1,56	-1,74	-1,47	-1,63

Результаты моделирования влияния момента затяжки винтов на перемещение балки приведены на рис. 4.

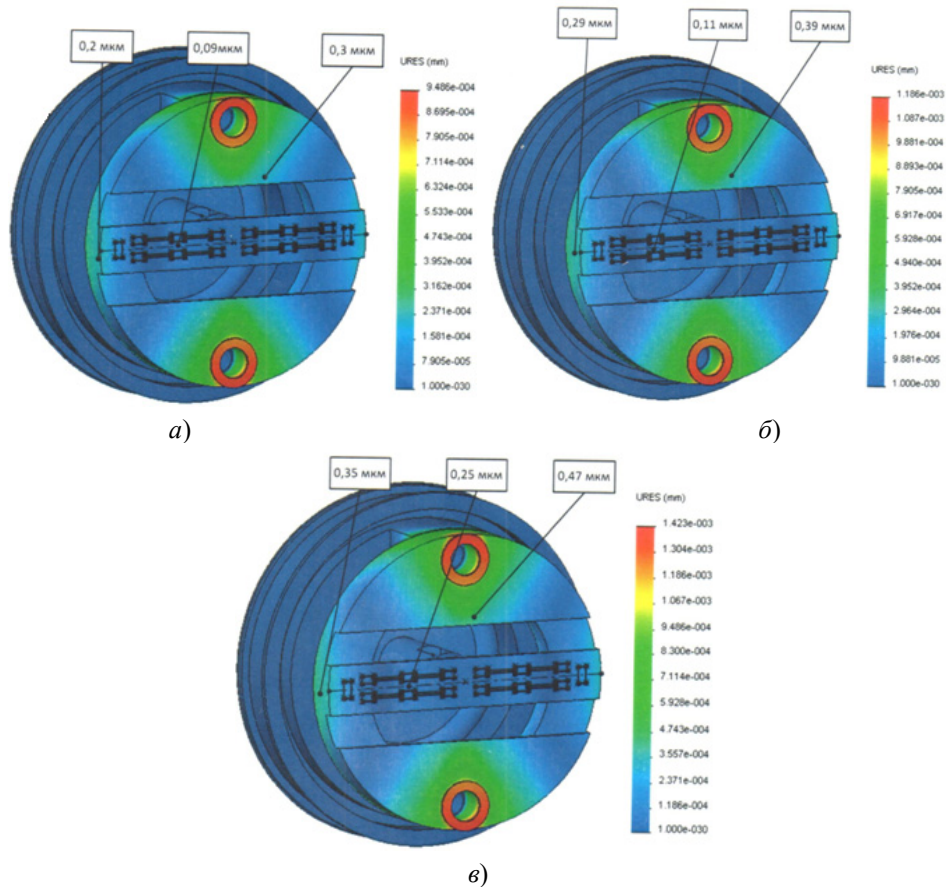


Рис. 4. Значение перемещения балки под действием момента затяжки винтов: а – перемещение балки 0,2 мкм; б – перемещение балки 0,29 мкм; в – перемещение балки 0,35 мкм

В ходе компьютерного моделирования было выявлено, что значение нагрева тензорезисторов не зависит от расстояния между ними. На рис. 5,а изображены эпюры распределения температурных полей при температуре окружающей среды +25 °С, расстоянием между резисторами 800 мкм под воздействием мощности рассеяния 0,02 мВт. На рис. 5,б изображены эпюры распределения температурных полей при температуре окружающей среды +25 °С, расстоянием между резисторами 500 мкм под воздействием мощности рассеяния 0,02 мВт.

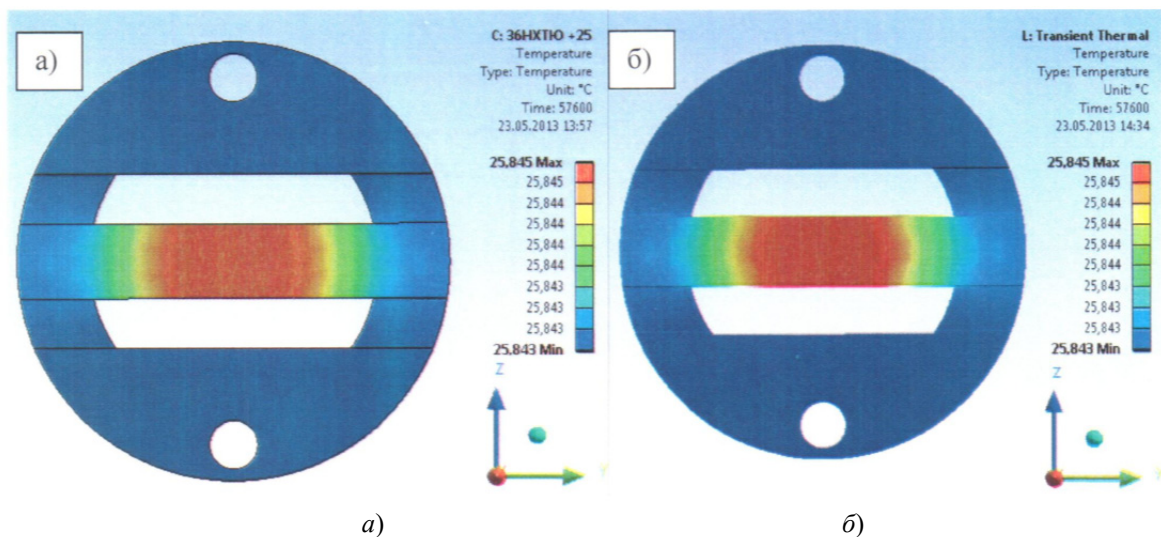


Рис. 5. Распределения температурных полей в зависимости от расстояния между тензорезисторами: а – 800 мкм; б – 500 мкм



На рисунках видно, что в обоих случаях значения максимальных температур совпадают.

### Заключение

В результате моделирования балки были определены значения перемещения при приложении к ее штоку сосредоточенной нагрузки 2,1 кг для предела измерения 1,6 кгс/см<sup>2</sup> в зависимости от значений допусков геометрических размеров.

Для мембранного блока были определены значения перемещения мембраны под воздействием номинального давления 1,6 кгс/см<sup>2</sup>, которые в зависимости от толщины мембраны и с учетом разброса характеристик сплава 36НХТЮ составили 95–156 мкм.

При моделировании использовались граничные условия, которые исключают перемещения: приспособления и штучера, а также исключают перемещения в резьбовых соединениях. Результаты моделирования подтверждены полученными экспериментальными данными.

По результатам моделирования выходной сигнал датчика составляет 20±32 мВ. Значение выходного сигнала, полученного в результате экспериментальных исследований, составляет 21–28 мВ.

Для воспринимающего элемента были определены значения перемещения упругого элемента при воздействии на мембрану номинального давления 1,6 кгс/см<sup>2</sup> с учетом допусков геометрических размеров балки и мембраны, а также с учетом разброса характеристик сплава 36НХТЮ, оно составило 49–75 мкм. Значения относительной деформации, возникающей при данных перемещениях, сведены в табл. 5 и 6.

Моделирование влияния затяжки резьбового соединения показало, что при воздействии момента затяжки 0,2±0,4 Н·м значение перемещения рабочей части балки составляет 0,09–0,25 мкм.

### Список литературы

1. Мусаев Р. Ш., Ляшенко А. В., Тюрин М. В., Ярославцева Д. А. Применение CALS-технологий и систем автоматизированного проектирования при создании датчко-преобразующей аппаратуры и систем для ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 91–28.
2. 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.
3. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18–21.
4. Трофимов А. А., Бастрыгин К. И. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 17–25.
5. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 51–55.
6. Фролов М. А., Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа // Датчики и системы. 2014. № 7. С. 22–25.
7. 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.
8. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation. М. : ДМК Пресс, 2010. 464 с.

### References

1. Musaev R.Sh., Lyashenko A.V., Tyurin M.V., Yaroslavtseva D.A. Application of CALS technologies and computer-aided design systems in the creation of sensor-conversion equipment and systems of rocket and space technology and ground-based space infrastructure. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2019;1:91–28. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, converters and systems based on them for measuring, monitoring and controlling technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;9:4–6. (In Russ.)
3. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Development of unified sensor designs for advanced measurement and control systems for special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;10:18–21. (In Russ.)

4. Trofimov A.A., Bastrygin K.I. System for measuring, monitoring, monitoring and diagnostics of rocket engine parameters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2017;3:17–25. (In Russ.)
5. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation of the sensor element of a strain-resistant absolute pressure sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2012;2:51–55. (In Russ.)
6. Frolov M.A., Musaev R.Sh., Trofimov A.A. Simulation of a string-type pressure sensor sensing element. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2014;7:22–25. (In Russ.)
7. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. [et al.]. Simulation of a piezoelectric pressure sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2017;1:20–28. (In Russ.)
8. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernyye raschety v SolidWorksSimulation = Engineering calculations in SolidWorks-Simulation*. Moscow: DMK Press, 2010:464. (In Russ.)

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

##### **Игорь Николаевич Чебурахин**

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

##### **Igor' N. Cheburakhin**

Chief technologist,  
Research and development institute  
for physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

##### **Иван Владимирович Ползунов**

главный конструктор направления –  
начальник центра №2,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: info@niifi.ru

##### **Ivan V. Polzunov**

Chief designer of the direction –  
head of the center № 2,  
Research and development institute  
for physical measurements  
(8/10 Volodarskogo 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 sub-department of information  
and measuring equipment and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

##### **Дарья Александровна Ярославцева**

инженер-конструктор,  
Научно-исследовательский  
институт физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10)  
E-mail: levik\_92@mail.ru

##### **Dar'ya A. Yaroslavtseva**

Design engineer,  
Research and development institute  
for physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

##### **Михаил Владимирович Тюрин**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10)  
E-mail: preobrazovatel@niifi.ru

##### **Mikhail V. Tyurin**

Candidate of technical sciences,  
senior researcher,  
Research and development institute  
for physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)



УДК 621.382  
doi:10.21685/2307-5538-2021-1-3

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЛЕВОГО МДП-ФОТОТРАНЗИСТОРА (СЕНСОРНОГО ЭЛЕМЕНТА) ИНФРАКРАСНОГО ДАТЧИКА

А. С. Китаев<sup>1</sup>, А. Н. Головяшкин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия  
<sup>1</sup> ar7style436@gmail.com, <sup>2</sup> angpenza@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В настоящее время для МДП-фототранзисторов отсутствует подробная методика расчета и проектирования за исключением подробного описания структуры и принципа действия. Данные приборы имеют большой потенциальный рынок сбыта как в гражданских, так и военных сферах. Целью работы является разработка методики проектирования сенсорного элемента инфракрасного датчика на базе полевого МДП-фототранзистора. *Материалы и методы.* Объектом исследования выступает МДП-фототранзистор. Предметом исследования является методика расчета и проектирования МДП-фототранзистора, выполняющего роль инфракрасного датчика. *Результаты.* Рассмотрены преимущества и недостатки МДП-фототранзистора в качестве фотоприемника. В рамках работы создана математическая модель оценки оптических свойств МДП-фототранзистора. Выведена прямая функциональная зависимость тока стока от падающего потока излучения, а также выполнен расчет основных характеристик устройства. Осуществлено моделирование процесса освещения структуры потоком излучения заданной частоты. Графически отражены изменения некоторых оптических параметров прибора. Итогом проведения работ стало создание рабочей математической модели для оценки оптических свойств МДП-фототранзистора с различной структурой. Разработана подробная методика расчета и проектирования МДП-фототранзистора, выполняющего роль ИК-датчика.

**Ключевые слова:** оптоэлектроника, фотоприемник, поглощение излучения, фототранзистор, многослойная структура, математическая модель, методика проектирования

**Для цитирования:** Китаев А. С., Головяшкин А. Н. Разработка методики проектирования полевого МДП-фототранзистора (сенсорного элемента) инфракрасного датчика // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 25–34. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-3

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DESIGNING A FIELD-EFFECT MDP-PHOTOTRANSISTOR (SENSOR ELEMENT) OF AN INFARED SENSOR

A.S. Kitaev<sup>1</sup>, A.N. Golovyashkin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup> ar7style436@gmail.com, <sup>2</sup> angpenza@gmail.com

**Abstract.** *Abstract.* Lack of detailed methods of calculation and design of the device under development. Availability of information only about the general structure and principle of operation. Extensive application in optoelectronics due to pulse and frequency characteristics. Lack of domestic analogues of photodetectors based on the MDP-structure. A large potential market, both in the civil and military spheres. The aim of the work is to develop a technique for designing a sensor element of an infrared sensor based on a field-effect MDP- phototransistor. *Materials and methods.* The object of the study is a MDP-phototransistor. The subject of the study is the method of calculation and design of the MDP-phototransistor, which performs the role of an infrared sensor. *Results.* Advantages and disadvantages of a MDP-phototransistor as a photodetector are considered. As part of the work, a mathematical model for evaluating the optical properties of a MDP-phototransistor was created. A direct functional dependence of the drain current on the incident radiation flux is derived, and the main characteristics of the device are calculated. Modeling of the process of illumination of the structure by a radiation flux of a given frequency is carried out. Changes in some optical parameters of the device are shown graphically. The result of this work was the creation of a working mathematical model for evaluating the

optical properties of a phototransistor with different structures. A detailed method for calculating and designing a MDP-phototransistor that acts as an infrared sensor has been developed.

**Keywords:** optoelectronics, photodetector, absorption of radiation, the phototransistor, multilayer structure, mathematical model, design methodology

**For citation:** Kitaev A.S., Golovyashkin A.N. Development of a method for designing a field-effect MDP-phototransistor (sensor element) of an infrared sensor *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2021;1:25–34. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-3

### Введение

МДП-фототранзистор – полевой транзистор с изолированным затвором, поглощающий излучение в подзатворной области. Поглощение ведет к изменению проводимости канала. Появляющийся процесс фотогенерации изменяет ток стока, пороговое напряжение, а также крутизну передаточной характеристики [1, 2].

МДП-фототранзистор имеет особенность, заключающуюся в том, что материал электрода затвора должен быть прозрачным или полупрозрачным, т.е. иметь максимально возможный коэффициент пропускания, чтобы эффективно использовать падающий световой поток. По принципу действия МДП-фототранзистор является аналогом фоторезистора, который имеет высокий коэффициент внутреннего усиления [3, 4].

Среди достоинств данного элемента стоит отметить: технологичность, очень высокую плотность фотоэлементов, более низкий уровень собственных шумов (по сравнению с биполярными фототранзисторами), а также совмещение функций фотоприемника и усилителя в одном устройстве [5].

К недостаткам же можно отнести следующее: более низкая чувствительность по сравнению с биполярными фототранзисторами, необходимость нанесения полупрозрачных покрытий для формирования электродов (возможны потери на отражение). К конструкции прибора и его технологии изготовления предъявляются повышенные требования, так как коэффициент прозрачности диэлектрика будет зависеть именно от технологического процесса [6].

Именно из-за отмеченных недостатков структуры на данный момент активно используются устройства на базе биполярных фототранзисторов. основополагающим фактором в вопросе предпочтения именно приборов на основе биполярных фототранзисторов выступает сложность нанесения тонкого полупрозрачного покрытия электрода затвора в МДП-фототранзисторе, более сложный технологический процесс и, как итог, лишние экономические затраты при производстве. Этот недостаток может быть устранен, если в будущем в качестве материала электрода затвора применить некий сильнолегированный полупрозрачный полупроводник [7].

### Формирование исходных данных для проектирования

Выполним оценку свойств МДП-фототранзистора, выполняющего роль ИК-датчика. Соответственно, рабочий диапазон длин волн составляет порядка 0,8–1,5 мкм.

В качестве материала подложки использован кремний *p*-типа, потому что канал проводимости *n*-типа более эффективен, так как подвижность электронов выше, чем дырок. Спектральная характеристика поглощения кремния удовлетворяет заданному рабочему диапазону длин волн и обеспечивает максимум поглощения в интересующей зоне.

Рабочую область затвора целесообразно изготовить квадратной формы для эффективной работы при различной ориентации источника излучения относительно фотоэлемента. Слишком большая площадь подзатворной области приведет к протеканию больших токов и перегрузки устройства, а слишком маленькая – к малой ширине пропускания потока излучения. Необходимо учитывать этот факт при выборе оптимальной длины и ширины канала. С учетом всего вышесказанного выбран оптимальный размер канала, составляющий 75×75 мкм [6, 7].

В качестве пары материалов электрод затвора – диэлектрик решено использовать  $\text{In}_2\text{O}_3$  –  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , поскольку пленки имеют общее окно прозрачности в рабочем диапазоне длин волн, сохраняя при этом высокий коэффициент пропускания, низкие коэффициенты поглощения, отражения, преломления и суммарно низкие потери излучения. Параметры возможных материалов приведены в табл. 1 и 2 соответственно [8].

Таблица 1

## Диэлектрические материалы и их основные свойства

Наименование материала (обозначение)				
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> (криолит)	MgF <sub>2</sub> (фторид магния)	ZnS (сульфид цинка)	CeO <sub>2</sub> (оксид церия)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (окс. алюминия)
Область прозрачности $\lambda_1 - \lambda_2$ , мкм				
0,2–14	0,11–10	0,38–25	0,46–2	0,2–11
Показатель преломления $n$ в интервале $\lambda_1 - \lambda_2$				
1,37–1,32	1,4–1,32	2,35–2,2	2,52–1,92	1,65–1,57
Показатель поглощения $\alpha$ (на длине волны $\lambda=1,06$ мкм), мкм <sup>-1</sup>				
0,2–2	0,25–2	0,4–5	0,4–2	0,5–1,6
Коэффициент пропускания $T$ на длине волны $\lambda=1,06$ мкм				
0,8–0,12	0,77–0,12	0,65–0,005	0,65–0,12	0,59–0,18
Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$				
5,1	6	7,1	9	8,5
Пробивное напряжение электрического поля, $E_{\text{проб}}$ , В/см				
10 <sup>9</sup>	8·10 <sup>6</sup>	2·10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>

Таблица 2

## Перечень материалов для изготовления электрода затвора

Наименование материала (обозначение)		
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (оксид индия)	ZnO (оксид цинка)	SnO <sub>2</sub> (оксид олова)
Область прозрачности $\lambda_1 - \lambda_2$ , мкм		
0,3–7	0,3–5,5	0,4–2,5
Показатель преломления $n$ в интервале $\lambda_1 - \lambda_2$		
1,83–1,79	2,06–2,01	2–1,96
Коэффициент поглощения $\alpha$ (на длине волны $\lambda=1,06$ мкм), мкм <sup>-1</sup>		
0,2–0,85	0,25–0,9	0,3–0,82
Коэффициент пропускания $T$ на длине волны $\lambda=1,06$ мкм		
0,8–0,15	0,75–0,1	0,7–0,18
Ширина запрещенной зоны, $E_g$ , эВ		
3,75	3,35	3,6
Проводимость, $\sigma$ , (Ом·см) <sup>-1</sup>		
10 000	8000	5000
Подвижность электронов, $\mu$ , см <sup>2</sup> ·В <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>		
35	20	15
Работа выхода, $A_{\text{эл}}$ , эВ		
5,1	4,2	4,8

На этом выбор конфигурации составных частей устройства и материалов для его изготовления завершён. Все необходимые начальные данные систематизированы и готовы к дальнейшей обработке. Исходные параметры проектируемой структуры представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Исходные данные

Наименование, обозначение, единица измерения	Численное значение
Концентрация примесей в подложке, $N$ , см <sup>-3</sup>	10 <sup>13</sup>
Толщина диэлектрика, $d$ , нм	50
Длина канала, $l$ , мкм	75
Ширина канала, $b$ , мкм	75
Глубина залегания областей истока и стока, $x$ , мкм	1,5
Концентрация примесей областей истока и стока, $N_{\text{ис}}$ , см <sup>-3</sup>	15·10 <sup>18</sup>
Температура, $T$ , К	300

Параметры полученной базовой структуры представлены в табл. 4. Расчеты представленных параметров выполнены по методике расчета базовой структуры МДП-фототранзистора, разработанной и апробированной на базе кафедры «Нано- и микроэлектронике» Пензенского государственного университета.

Таблица 4

Параметры базовой структуры

Наименование, обозначение, единица измерения	Численное значение
Пороговое напряжение затвор–исток, $U_{\text{зи.пор}}$ , В	0,546
Максимальное напряжение затвор–исток, $U_{\text{зи.макс}}$ , В	25
Напряжение смыкания сток–исток, $U_{\text{си.см}}$ , В	31
Напряжение пробоя сток–подложка, $U_{\text{проб.сп}}$ , кВ	9,1
Начальный ток стока, $I_{\text{нач.т.ст}}$ , мА	–8,43

### Математическая модель структуры под воздействием излучения

Вывод функциональной зависимости тока стока от потока падающего излучения. Зададимся диапазоном значений потока излучения  $\Phi_0 = 10^{14} \dots 10^{20} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Тогда скорость генерации электронов  $g$  можно определить следующим образом:

$$g = \alpha\beta\Phi_0, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения кремния, составляющий 0,7;  $\beta$  – квантовый выход, равный 0,8.

Начальная поверхностная концентрация электронов (неосновных носителей заряда) выражается через закон действующих масс:

$$n_{s_0} = n_0 = \frac{n_i^2}{p_0}. \quad (2)$$

При подстановке исходных данных получаем, что  $n_{s_0} = 2,103 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ .

Для однородно легированной подложки полная поверхностная концентрация электронов определяется простой суммой:

$$n_s = n_{s_0} + \Delta n_\Phi, \quad (3)$$

где  $\Delta n_\Phi$  – неравновесная концентрация носителей заряда, возникающая в результате фотогенерации:

$$\Delta n_\Phi = g\tau_0. \quad (4)$$

Так как  $n_s = n_{s_0} + \Delta n_\Phi = n_{s_0} \exp(y_s)$ , то отсюда следует выражение для безразмерного поверхностного потенциала:

$$y_s = \ln \left( \frac{n_s}{n_{s_0}} \right), \quad (5)$$

который связан с обычным потенциалом  $\phi$  через тепловой потенциал ( $\phi = y \frac{kT}{q}$ ).

Полное значение поверхностного потенциала определяется также простой алгебраической суммой:

$$y_s = y_s^H + \Delta y_s, \quad (6)$$

где  $y_s^H$  – начальный поверхностный потенциал;  $\Delta y_s$  – неравновесный поверхностный потенциал, возникающий в результате фотогенерации неосновных носителей заряда.

При подаче порового напряжения на затвор фототранзистора начальный изгиб зон энергетической диаграммы полупроводника должен соответствовать началу режима сильной инверсии  $y_s^H = 2y_{inv}$ , где  $y_{inv}$  – потенциал начала инверсии. Тогда

$$y_s^{полн} = y_s^H + \ln\left(\frac{n_s}{n_{s_0}}\right). \quad (7)$$

Изменяющийся поток излучения приводит к изменению полного поверхностного потенциала. Это в свою очередь эквивалентно изменению напряжения затвор–исток:

$$U_{зи} = U_{зи}^H + \Delta U_{зи}, \quad (8)$$

где  $U_{зи}^H$  – начальное значение напряжения на затворе;  $\Delta U_{зи}$  – изменение напряжения.

Для данной структуры  $U_{зи}^H = U_{зи.пор} = 0,546$  В. Из выражения (8) следует

$$U_{зи}^{полн} = U_{зи}^H - \phi_K - \frac{Q_{sc}}{C_d} + \frac{kT}{q} y_s, \quad (9)$$

где  $\phi_K$  – контактная разность потенциалов металл – полупроводник;  $C_d$  – удельная емкость диэлектрика;  $Q_{sc}$  – поверхностная плотность заряда на границе диэлектрик – полупроводник.

В результате мы получили функцию зависимости напряжения затвора от изменения поверхностного потенциала.

Далее приступим к расчету зависимости тока стока МДП-фототранзистора от падающего излучения. Для расчета выбрана модель 1-го уровня, в которой зарядом поверхностных состояний пренебрегают. Главное допущение этой модели заключается в отсутствии подвижных носителей заряда при напряжениях на затворе меньше порогового.

Взяв во внимание все вышесказанное, используем известное выражение для напряжения насыщения между стоком и истоком:

$$U_{си.нас} = U_{зи} - U_{зи.пор}, \quad (10)$$

крутизны передаточной характеристики:

$$S = \mu_{n_0} C_d \frac{b}{l} (U_{зи} - U_{зи.пор}) \quad (11)$$

и тока стока:

$$I_c = S U_{зи}. \quad (12)$$

Выполняем преобразование выражения (12):

$$\begin{aligned} I_c = S U_{зи} &= \mu_{n_0} C_d \frac{b}{l} (U_{зи} - U_{зи.пор}) U_{зи} = \\ &= \mu_{n_0} C_d \frac{b}{l} \left( U_{зи}^H - \phi_K - \frac{Q_{sc}}{C_d} + \frac{kT}{q} 2y_s - U_{зи.пор} \right) \left( U_{зи}^H - \phi_K - \frac{Q_{sc}}{C_d} + \frac{kT}{q} y_s \right), \end{aligned}$$

где

$$y_s = y_s^H + \ln\left(\frac{n_s}{n_{s_0}}\right) = y_s^H + \ln\left(\frac{n_{s_0} + \Delta n_\phi}{n_{s_0}}\right) = y_s^H + \ln\left(\frac{n_{s_0} + g\tau}{n_{s_0}}\right) = y_s^H + \ln\left(\frac{n_{s_0} + \alpha\beta\Phi_0\tau}{n_{s_0}}\right).$$

Итогом проведенных операций стало получение прямой функциональной зависимости тока стока от величины потока падающего излучения. На рис. 1 представлена полученная статическая характеристика спроектированного МДП-фототранзистора.

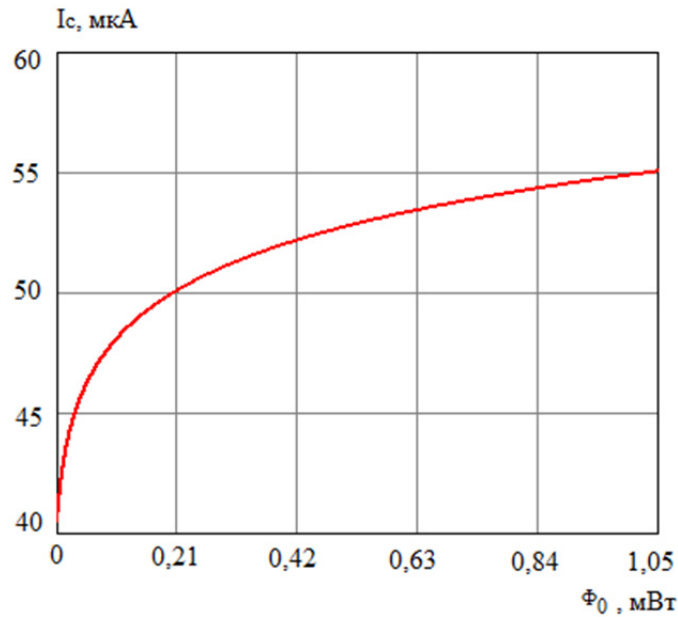


Рис. 1. Зависимость тока стока МДП-фототранзистора от потока

Полученные результаты сведены в табл. 5.

Таблица 5

Численное отражение функциональной зависимости тока стока от потока излучения

Поток излучения, мВт	Ток стока, мкА
0,006	42,12
0,014	43,35
0,047	45,99
0,151	49,14
0,248	50,59
0,346	51,59
0,457	52,44
0,613	53,35
0,738	53,93
0,902	54,56
1,034	54,99

Рассчитаем основные параметры спроектированной структуры. На основе данных, полученных из базового расчета, можно судить о рабочем диапазоне напряжений прибора, а именно: рабочее напряжение затвор–исток ( $U_{p,зи}$ ) составляет 0,6–25 В, а сток–исток ( $U_{p,си}$ ) в свою очередь – 0–31 В. Область спектральной чувствительности устройства ( $\lambda$ ) составляет порядка 0,3–2 мкм. Темновой ток фототранзистора ( $I_T$ ) определяем при напряжении затвора, равном 0,6 В. Его значение составляет 1 мкА.

Ток стока при том же значении  $U_{зи}$  и потока излучения в 6,3 мкВт составляет 42 мкА, тогда фототок ( $I_\Phi$ ) определяется как разность тока стока с темновым и равен 41 мкА.

За значение токовой интегральной чувствительности устройства принимают отношение

$$S_{\text{инт}} = \frac{I_\Phi}{\Phi_V}, \quad (13)$$

где  $\Phi_V$  – поток излучения, выраженный в люменах.

Производим расчет выражения (13) при потоке излучения в 6,3 мкВт и, соответственно, фототоке 41 мкА. Для перевода потока излучения в люмены используем равенство

$$\Phi_V = 683\Phi_0 V(\lambda), \quad (14)$$

где  $\Phi_0$  – поток излучения, выраженный в Вт;  $V(\lambda)$  – значение относительной спектральной световой эффективности для дневного зрения, соответствующее той же длине волны  $\lambda$ .

Для примера была выбрана длина волны  $\lambda = 1,06$  мкм. Тогда  $\Phi_V = 4,3$  мВт и  $S_{\text{инт}} = 9,53$  мА/лм.

Порог чувствительности прибора ( $\Phi_{\text{пор}}$ ) находится при условии  $I_c = 2I_T$ . По результатам вычислений его значение составляет 1,6 мкВт.

За коэффициент усиления фототока МДП-фототранзистора принимают отношение  $K_{\text{у.ф.}} = \frac{I_{\text{ф.}}}{I_T}$ . В режиме фиксации излучения, пока выходная характеристика не вошла в насыщение, из-за низкого значения темнового тока коэффициент усиления может достигать значений в несколько сотен. В режиме модуляции излучения  $K_{\text{у.ф.}}$  имеет значения порядка 50.

Все полученные результаты сводим в табл. 6.

Таблица 6

Основные параметры МДП-фототранзистора

Наименование, обозначение, единица измерения	Значение
Рабочее напряжение затвор–исток, $U_{\text{р.зи}}$ , В	0,6–25
Рабочее напряжение сток–исток, $U_{\text{р.си}}$ , В	0–31
Область спектральной чувствительности, $\lambda$ , мкм	0,3–2
Темновой ток, $I_T$ , мкА	1
Фототок, $I_{\text{ф.}}$ , мкА	41
Токовая интегральная чувствительность, $S_{\text{инт}}$ , мА/лм	9,53
Порог чувствительности, $\Phi_{\text{пор}}$ , мкВт	1,6
Коэффициент усиления фототока в режиме фиксации излучения $K_{\text{у.ф.}}$	До 1000
Коэффициент усиления фототока в режиме модуляции $K_{\text{у.ф.}}$	~ 50

На основе данных из табл. 5 и 6, а также с помощью формул (13) и (14) построим функциональную зависимость токовой интегральной чувствительности от потока излучения. Полученный результат представлен на рис. 2.

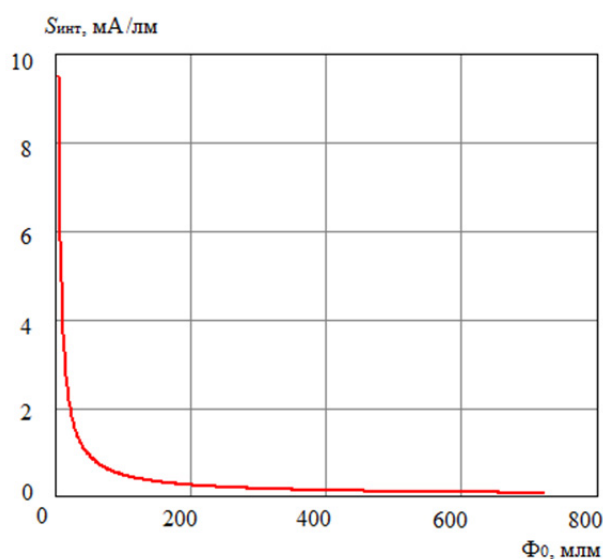


Рис. 2. Зависимость токовой интегральной чувствительности МДП-фототранзистора от потока излучения

Итоговые результаты сведены в табл. 7.

Таблица 7

Численное отражение функциональной зависимости токовой интегральной чувствительности от потока излучения

Поток излучения, мВт	Токовая интегральная чувствительность, мА/лм
4,33	9,507
9,81	4,319
32	1,390
103	0,467
169	0,293
236	0,214
312	0,165
419	0,125
504	0,105
616	0,087
706	0,076

На этом расчет основных параметров и характеристик МДП-фототранзистора можно считать успешно завершенным. В ходе составления математической модели устройства были построены необходимые характеристики и найдены численные значения основных параметров структуры.

#### Заключение

При проектировании МДП-фототранзистора необходимо учитывать не только электрические свойства материалов, но и оптические. Оптимальный выбор многослойной системы материалов электрод затвора – диэлектрик – полупроводник будет гарантировать надежную и стабильную работу устройства в эксплуатационных условиях.

Алгоритм проектирования выглядит следующим образом:

1. Определение конкретной области применения элемента с предполагаемым рабочим диапазоном длин волн.
2. Выбор материала полупроводниковой подложки. Материал должен обеспечивать максимальный коэффициент поглощения в рабочем диапазоне длин волн для обеспечения интенсивного процесса фотогенерации носителей заряда.
3. Анализ возможных конструкций прибора, поиск оптимального варианта конфигурации затвора.
4. Построение двухслойной системы электрод затвора – диэлектрик. Данная структура должна иметь общее окно прозрачности и обеспечивать максимальный коэффициент пропускания в рабочем диапазоне длин волн, а также сохранять низкие значения коэффициентов поглощения и отражения. Для этого необходимо наличие минимальных и близких по значению коэффициентов преломления, что в конечном счете позволит избежать потерь излучения. Диэлектрик обязан обладать оптимальными значениями пробивного напряжения электрического поля и относительной диэлектрической проницаемостью для обеспечения стабильной работы устройства в эксплуатационных условиях, чтобы не произошел пробой структуры со стороны электрода затвора.
5. Анализ и выбор оптимальных параметров полученной структуры (концентрация примеси в подложке, концентрация примеси в областях стока и истока, длина и ширина проводящего канала, толщина диэлектрика, температурные условия, глубина залегания областей истока и стока) с целью выполнения расчета базовой структуры устройства без учета влияния потока излучения.
6. Расчет базовой структуры МДП-фототранзистора:
  - а) вычисление электрических параметров ( $U_{\text{зи.пор}}$ ,  $U_{\text{зи.макс}}$ ,  $U_{\text{си.см}}$ ,  $U_{\text{проб.сп}}$ ,  $I_{\text{нач.т.ст}}$ );
  - б) расчет статических характеристик (семейство выходных ВАХ, семейство передаточных характеристик, семейство зависимостей крутизны передаточной характеристики, зависи-



мость сопротивления канала от напряжения между затвором и истоком, семейство зависимостей активной составляющей малосигнальной проводимости, частотные характеристики).

7. Расчет структуры и определение параметров МДП-фототранзистора с учетом потока излучения:

а) составление математической модели влияния потока излучения на статические характеристики устройства;

б) определение и расчет параметров МДП-фототранзистора (диапазон рабочих напряжений, область спектральной чувствительности, темновой ток, фототок, токовая интегральная чувствительность, порог чувствительности прибора, коэффициент усиления фототока);

в) систематизация и обработка полученных результатов, составление итоговых таблиц.

### **Основные выводы и результаты**

В рамках проделанной работы разработан МДП-фототранзистор, выполняющий роль ИК-датчика. Составлена подробная методика расчета его основных параметров и характеристик, представлены рекомендации и перечень основных требований при проектировании структуры элемента. На основе анализа научной литературы определена оптимальная конструкция прибора с целью создания фотоэлемента. Составлен перечень основных материалов для проектирования структуры устройства.

На основании заявленных требований осуществлен выбор конкретных материалов для формирования многослойной системы электрод затвора – диэлектрик – полупроводник, удовлетворяющей оптическим и электрическим критериям фотоустройства. После этого была составлена табл. 3, включающая перечень исходных данных для расчета базовой структуры МДП-фототранзистора. Стоит отметить, что все расчеты произведены для комнатной температуры в 300 К.

На основании полученных результатов разработана математическая модель МДП-фототранзистора с учетом влияния потока излучения. Произведен подробный расчет, анализ характеристик и параметров структуры с использованием соответствующих выражений. Составлена рабочая методика расчета и проектирования рассматриваемого устройства. Все полученные результаты систематизированы и сведены в табл. 5–7. Создан алгоритм и разработана программа расчета основных параметров и статических характеристик полупроводникового устройства в виде МДП-фототранзистора.

### **Список литературы**

1. Ермуратский П., Лычкина Г. Электротехника и электроника. М. : ДМК, 2015. 416 с.
2. Кузнецов А. В., Палагута К. А. Аналоговая и цифровая электроника. М. : МГИУ, 2010. 264 с.
3. Немцов М. В. Электротехника и электроника. М. : Высш. шк., 2007. 560 с.
4. Иванов В. И., Аксенов А. И., Юшин А. М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справочник. М. : Энергоатомиздат, 1989. 448 с.
5. Овсюк В. Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда : монография. М. : Наука, 1984. 256 с.
6. Борисенко В. Е. Нанoeлектроника. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. 223 с.
7. Галкин В. И. Промышленная электроника и микроэлектроника. М. : Высш. шк., 2006. 350 с.
8. Игнатов А. Н. Оптоэлектронные приборы и устройства. М. : Эко-Трендз, 2006. 272 с.

### **References**

1. Ermuratskiy P., Lychkina G. *Elektrotekhnika i elektronika = Electrical and Electronics Engineering*. Moscow: DMK, 2015:416. (In Russ.)
2. Kuznetsov A.V., Palaguta K.A. *Analogovaya i tsifrovaya elektronika = Analog and digital electronics*. Moscow: MGIU, 2010:264. (In Russ.)
3. Nemtsov M.V. *Elektrotekhnika i elektronika = Electrical and Electronics Engineering*. Moscow: Vyssh. shk., 2007:560. (In Russ.)
4. Ivanov V.I., Aksenov A.I., Yushin A.M. *Poluprovodnikovye optoelektronnyye pribory: spravochnik = Semiconductor optoelectronic devices: reference*. Moscow: Energoatomizdat, 1989:448. (In Russ.)
5. Ovsyuk V.N. *Elektronnyye protsessy v poluprovodnikakh s oblastyami prostranstvennogo zaryada: monografiya = Electronic processes in semiconductors with spatial charge domains: monograph*. Moscow: Nauka, 1984:256. (In Russ.)

6. Borisenko V.E. *Nanoelektronika* = Nanoelectronics. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2009:223. (In Russ.)
7. Galkin V.I. *Promyshlennaya elektronika i mikroelektronika* = Industrial electronics and microelectronics. Moscow: Vyssh. shk., 2006:350. (In Russ.)
8. Ignatov A. N. *Optoelektronnye pribory i ustroystva* = Optoelectronic devices and devices. Moscow: Eko-Trendz, 2006:272. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors*

**Александр Сергеевич Китаев**

магистрант,

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

E-mail: ar7style436@gmail.com

**Aleksandr S. Kitaev**

Master degree student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Алексей Николаевич Головяшкин**

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры нано- и микроэлектроники,

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

E-mail: angpenza@gmail.com

**Aleksey N. Golovyashkin**

Candidate of technical sciences, associate professor,

associate professor of sub-department

of nano- and microelectronics,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.398

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-4

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СИНГУЛЯРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДОДЕТЕКТОРНОЙ ЗАПИСИ СИГНАЛА

А. С. Дуников<sup>1</sup>, А. А. Бянкин<sup>2</sup>, Э. А. Бардаев<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Генеральный штаб Вооруженных сил РФ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> artem.sever1@yandex.ru, <sup>2,3</sup> aab51@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Результаты телеметрических измерений имеют очень важное значение для подтверждения летно-технических характеристик и оценивания технического состояния летательного аппарата. В сложных условиях помеховой обстановки могут быть потеряны или искажены информационно значимые фрагменты результатов телеметрического контроля. В связи с этим разработка методов и алгоритмов восстановления телеметрической информации в условиях помех имеет важное прикладное значение. *Материалы и методы.* Для восстановления телеметрической информации предложено использовать метод сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи группового телеметрического сигнала. При этом выдвинута гипотеза о влиянии параметров сингулярно-спектрального разложения на достоверность восстановления телеметрической информации. *Результаты.* Посредством имитационного моделирования процессов восстановления определен диапазон оптимальных параметров применения сингулярно-спектрального разложения додетекторной записи группового телеметрического сигнала, обеспечивающих высокую степень достоверности восстановления информации. *Вывод.* В сложных условиях помеховой обстановки, характеризующихся низким отношением сигнал/шум, использование оптимального параметра алгоритма восстановления телеметрической информации на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи сигнала позволяет обеспечить высокую степень достоверности представления телеметрируемых параметров.

**Ключевые слова:** додетекторная запись, послесекансная обработка, сингулярно-спектральный анализ, телеметрическая информация

**Для цитирования:** Дуников А. С., Бянкин А. А., Бардаев Э. А. Восстановление телеметрической информации летательных аппаратов с учетом выбора параметров сингулярно-спектрального разложения додетекторной записи сигнала // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 35–43. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-4

### RECOVERY OF TELEMETRY INFORMATION OF AIRCRAFT TAKING INTO ACCOUNT THE CHOICE OF THE PARAMETERS OF THE SINGULAR-SPECTRAL DECOMPOSITION OF THE PRE-DETECTOR SIGNAL RECORDING

A.S. Dunikov<sup>1</sup>, A.A. Byankin<sup>2</sup>, E.A. Bardaev<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> General Staff of the Armed Forces, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup> artem.sever1@yandex.ru, <sup>2,3</sup> aab51@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Telemetry information is very important for confirming the flight performance and assessing the technical condition of the aircraft. In difficult jamming conditions, information-significant fragments of telemetry control results can be lost or distorted. In this regard, the development of methods and algorithms for recovering tele-

metric information is of great practical importance. *Materials and methods.* To restore telemetry information, it is proposed to use the method of singular-spectral analysis of pre-detector recording of a group telemetry signal. At the same time, a hypothesis was put forward about the influence of the parameters of the singular-spectral decomposition on the reliability of the restoration of telemetric information. *Results.* By means of simulation modeling of restoration processes, a range of optimal parameters for the use of singular-spectral decomposition of pre-detector recording of a group telemetry signal has been formed, providing a high degree of reliability of information restoration. *Conclusion.* In difficult conditions of interference, characterized by a low signal-to-noise ratio, the use of the optimal parameters of the telemetry information recovery algorithm based on the application of the method of singular-spectral analysis of the pre-detector signal recording allows a high degree of reliability in the presentation of telemetry parameters.

**Keywords:** pre-detector recording, post-session processing, singular spectral analysis, telemetry information

**For citation:** Dunikov A.S., Byankin A.A., Bardaev E.A. Recovery of telemetry information of aircraft taking into account the choice of the parameters of the singular-spectral decomposition of the pre-detector signal recording. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:35–43. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-4

### Введение

В связи со значительным усложнением создаваемых летательных аппаратов (ЛА) различного класса и назначения, обусловленным реализацией в них новых функциональных и технических возможностей, увеличивается значимость телеметрической информации (ТМИ), передаваемой с борта при проведении летных испытаний и эксплуатации. Это обусловлено тем, что именно результаты анализа и обработки ТМИ позволяют достоверно оценить текущее техническое состояние и достигнутые в ходе разработки летно-технические характеристики ЛА [1]. На достоверность регистрации ТМИ, а вместе с тем и на достоверность определения технического состояния и оценивания летно-технических характеристик значительное влияние оказывают сложные помеховые условия в радиоканале передачи данных. Эти условия характеризуются низким отношением сигнал/шум и многолучевостью распространения сигнала. Так, в частности, достаточно часто объем потери и искажения ТМИ, обусловленный вышеуказанными условиями приема сигнала, может достигать 5–10 % от всего объема зарегистрированных результатов телеконтроля [2]. При этом в данное процентное соотношение могут попадать и информационно значимые телеметрируемые параметры (ТМП), оценивание поведения которых технически необходимо для дальнейшей безаварийной эксплуатации ЛА. Следовательно, разработка методов и алгоритмов обработки ТМИ ЛА при их летных испытаниях и эксплуатации, обеспечивающих повышение надежности и достоверности регистрации результатов телеконтроля, является на настоящий момент актуальной.

### Анализ существующих подходов к повышению достоверности регистрации телеметрических измерений и математическая постановка задачи

В работе [3] показано, что использование распространенных в настоящее время подходов повышения достоверности регистрации ТМИ, заключающихся в применении методов разнесенного приема и методов постдетекторной обработки результатов телеизмерений в сложных условиях приема сигнала, не позволяет восстановить искаженные временные участки группового телеметрического сигнала (ГТС), являющегося переносчиком результатов телеметрического контроля с борта ЛА на наземную аппаратуру обработки и анализа ТМИ, а следовательно, и переносчиком информационно значимых ТМП, описывающих характер функционирования ЛА.

В ряде работ [3–4] в целях повышения достоверности зарегистрированной ТМИ предлагается использовать методы и алгоритмы обработки сигнала, использующие предварительную запись оцифрованных значений сигнала непосредственно с выходов аналоговых квадратурных каналов, позволяющих избежать недостатков, которые присущи подходам с фиксированным алгоритмом обработки [4]. Данные методы и алгоритмы в перспективе должны обеспечить восстановление искаженной информации за счет усложнения процедур обработки сигнала, выполняемых в отложенном времени. Предварительная запись оцифрованных значений сигнала с выходов аналоговых квадратурных каналов называется додетекторной записью.

Вместе с тем научно-методический аппарат восстановления ТМИ по результатам обработки ее додетекторной записи практически не разработан. В работе [5] предложен алгоритм восстановления ТМИ на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи сигнала. Содержание данного алгоритма заключается в выполнении следующих действий:

Шаг 1. Осуществляется ввод исходных данных, необходимых для работы алгоритма, в качестве которых выступают:

– додетекторная запись зарегистрированного группового телеметрического сигнала, описанная математической моделью дискретного временного ряда

$$S_{\text{вх}} = \{s^{(\text{вх})}(t_0), s^{(\text{вх})}(t_1), \dots, s^{(\text{вх})}(t_{N-1})\}, \quad (1)$$

где  $N = f_{\text{д}} T_{\text{с}}$  – количество дискретных отсчетов сигнала;  $f_{\text{д}}$  – частота дискретизации;  $T_{\text{с}}$  – длительность зарегистрированного фрагмента сигнала;  $s^{(\text{вх})}$  – входной радиосигнал;  $t_0$  – начальный момент времени отсчета анализируемого радиосигнала;

– множество информационно значимых ТМП, необходимых для оценивания технического состояния ЛА  $\mathbf{H} = \{h_{ij} \mid i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$ ;

– размерность окна сингулярно-спектрального разложения  $L$ .

Шаг 2. Выполняется процедура вложения. Во время данной процедуры исходный временной ряд  $S_{\text{вх}}$  длины  $N$ , соответствующий принятому сигналу, преобразуется в последовательность  $K$  многомерных векторов. В процессе процедуры вложения образуется  $K = N - L + 1$  векторов вложения, имеющих размерность  $L$  и описываемых как  $X_z = (s_{z-1}^{(\text{вх})}, \dots, s_{z+L-2}^{(\text{вх})})^T$ ,  $1 \leq z \leq K$ .

В результате процедуры вложения образуется траекторная матрица додетекторной записи принятого сигнала

$$\mathbf{X} = (x_{zy})_{z,y=1}^{L,K} = \begin{pmatrix} s_0^{(\text{вх})} & \dots & s_{K-1}^{(\text{вх})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{L-1}^{(\text{вх})} & \dots & s_{N-1}^{(\text{вх})} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Шаг 3. Осуществляется сингулярное разложение сформированной траекторной матрицы  $\mathbf{X}$ , описываемой выражением (2). Данное сингулярное разложение можно записать в следующем математическом виде:

$$\mathbf{X}_{\text{разл}} = \sum_{a=1}^d \lambda_a U_a V_a. \quad (3)$$

При этом наборы  $\langle \lambda_a, U_a, V_a \rangle$  называются собственными числами траекторной матрицы и являются безразмерными величинами. Значения  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_d$ , при всех  $\lambda > 0$ , являются сингулярными числами траекторной матрицы;  $U_1, \dots, U_d$  – ортонормированная система левых сингулярных векторов или собственные вектора;  $V_1, \dots, V_d$  – ортонормированная система правых сингулярных векторов или факторные вектора.

Шаг 4. Выполняется группировка собственных троек траекторной матрицы  $\{1, \dots, d\}$ , таким образом, что образуется  $\varepsilon$  непересекающихся подмножеств, которые обозначим как  $\mathbf{I}_1, \dots, \mathbf{I}_{\varepsilon}$ . В результате формируются несколько результирующих непересекающихся траекторных матриц  $\mathbf{X}_{I_{\varepsilon}} = \mathbf{X}_{I_1} + \dots + \mathbf{X}_{I_{\varepsilon}}$ . Вопросы делимости собственных троек затрагивают дополнительные области исследований. В разработанном алгоритме собственные числа не группировались, а располагались в порядке убывания.

Шаг 5. Осуществляется диагональное усреднение, заключающееся в переводе  $\mathbf{X}_{I_{\varepsilon}}$  в новый ряд исходной длины  $N$ , иными словами, получения значений временного ряда  $s_0^{(\text{обп})}, \dots, s_{N-1}^{(\text{обп})}$ .

Шаг 6. Осуществляется обработка полученного временного ряда  $S_{\text{обп}} = \{s^{(\text{обп})}(t_0), s^{(\text{обп})}(t_1), \dots, s^{(\text{обп})}(t_{N-1})\}$  приемным устройством.

Использование преимуществ сингулярно-спектрального анализа, заключающихся в возможности выделить интересующие компоненты временных рядов, в частности, отдельные аддитивные составляющие исходного ряда, различные колебательные и периодические компоненты, а также шумовые компоненты, выделить спектральные составляющие сигнала с учетом изменения амплитуды и фазы квазипериодического сигнала, а также отфильтровать спектральные компоненты гармонического сигнала, позволяет, как показано в работе [6], в зависимости от условий приема сигнала повысить на 8–85 % степень достоверности представления ТМП, по сравнению с существующей технологией регистрации ТМИ [5].

Значительный диапазон изменения степени достоверности представления телеметрируемых параметров обусловлен использованием в данном алгоритме при осуществлении процеду-

ры восстановления только первой собственной тройки траекторной матрицы  $X_1 = \langle \lambda_1, U_1, V_1 \rangle$ . Вместе с тем гармоническую составляющую полезного сигнала содержат  $c$  собственных троек при условии, что  $c < d$ . Кроме того, при реализации данного алгоритма не учитывалось возможное изменение размерности окна сингулярно-спектрального разложения  $L$ , значение которой теоретически может влиять на степень достоверности представления восстановленного ТМП, а использовалось лишь ее заранее заданное, исходя из объема анализируемой выборки, постоянное значение  $L = \text{const}$ .

В целях поиска эффективных путей реализации алгоритма восстановления ТМИ на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи сигнала целесообразно в заданных условиях сложной помеховой обстановки  $Q_{\text{зад}}$  осуществить конечномерный выбор оптимальных параметров его применения.

Статистический анализ результатов регистрации ТМИ при проведении сеансов измерений по пускам ракетносителей, основанный на оценивании законов распределения поведения параметров автоматической регулировки усиления, являющейся параметром внутренней телеметрии наземной приемно-регистрирующей станции (НПРС), показал, что наиболее подвержена искажению информация на участках входа ЛА в зону радиовидимости антенно-фидерных систем НПРС, выходы из данной зоны, а также на участках с повышенной вибрационной активностью ЛА, обусловленных отделением конструктивных элементов, возникновением взрывоопасных ситуаций. Пример результатов статистического анализа зарегистрированной ТМИ представлен на рис. 1.

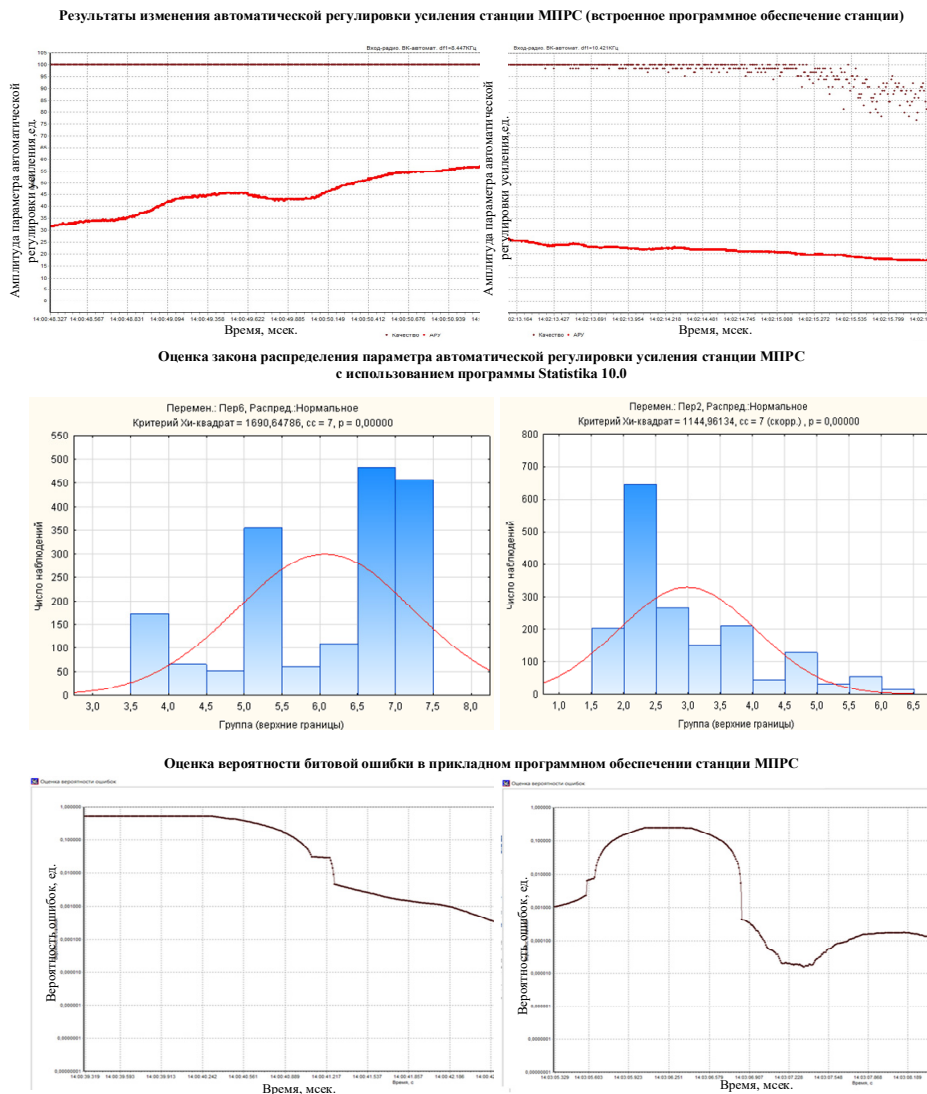


Рис. 1. Результаты статистического анализа зарегистрированной ТМИ на участках входа и выхода из зоны радиовидимости

Результаты статистического анализа показывают, что плотность вероятности распределения помехи на данных участках имеет нормальный закон распределения, что соответствует воздействию белого гауссовского шума, а рассчитываемая НПС вероятность битовой ошибки эквивалентна отношению сигнал/шум, имеющему значение в пределах от  $-4$  до  $1$  дБ.

Таким образом, необходимо в заданных условиях помеховой обстановки определить оптимальные параметры  $A$  применения алгоритма восстановления ТМИ на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи сигнала  $f$ , к которым относятся количество собственных троек  $X_c$ , используемых при восстановлении временного ряда, и размерность окна сингулярно-спектрального разложения  $L$ , при которой степень достоверности  $G$  получаемых ТМП имела максимальное значение.

Математически данная постановка задачи записывается следующим образом:

$$A = f(X_c, L) \Big|_{Q_{\text{зад}}}^{X_c, L = \text{var}} \rightarrow \hat{G} = \max(G). \quad (3)$$

При этом степень достоверности оценивается как [2]

$$G = \frac{R_{\text{пр.прин.}}}{R_{\text{исход.}}} 100 \%, \quad (4)$$

где  $R_{\text{пр.прин.}}$  – количество правильно принятых (восстановленных) слов, характеризующих одно измерение ТМП во времени по сравнению с исходным неискаженным параметром;  $R_{\text{исход.}}$  – количество слов исходного неискаженного ТМП на всем интервале его изменения.

### *Выбор оптимальных параметров алгоритма восстановления телеметрической информации*

В целях подбора оптимального количества собственных троек  $X_c$ , используемых при восстановлении временного ряда, и величины окна сингулярно-спектрального разложения  $L$  разработана программа имитационного моделирования в графическом интерфейсе пользователя среды Matlab. Исходя из основ статистической теории связи, заключающихся в том, что максимум достоверности представления данных, переданных по радиоканалу, обеспечивается за счет минимума вероятности искажения информации в радиоканале в качестве оцениваемого показателя при поиске оптимальных параметров алгоритма, использована вероятность битовой ошибки  $P_b$ . Иными словами,

$$\hat{G} = \max(G) \Big|_{P_b = \min}. \quad (5)$$

Это обусловлено тем, что элементарной информационной посылкой при передаче ГТС является информационный бит, принимающий номинальное значение «0» или «1».

Результаты имитационного моделирования для отдельных значений отношения сигнал/шум представлены на рис. 2–4.

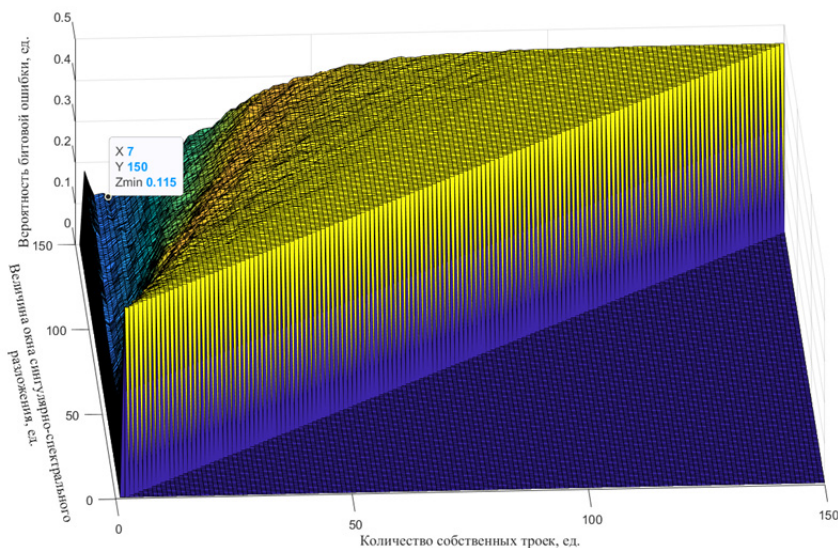


Рис. 2. Результаты оценивания вероятности битовой ошибки при отношении сигнал/шум, равном  $-4$  дБ



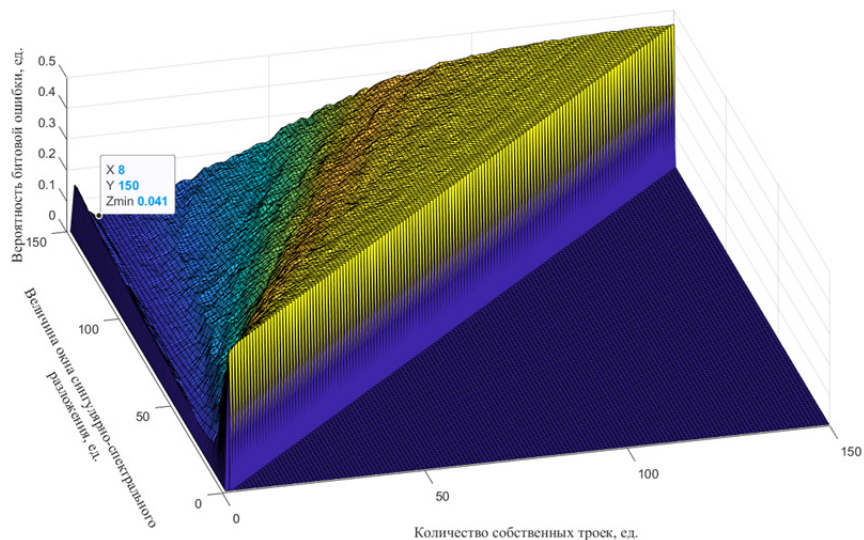


Рис. 3. Результаты оценивания вероятности битовой ошибки при отношении сигнал/шум, равном  $-2$  дБ

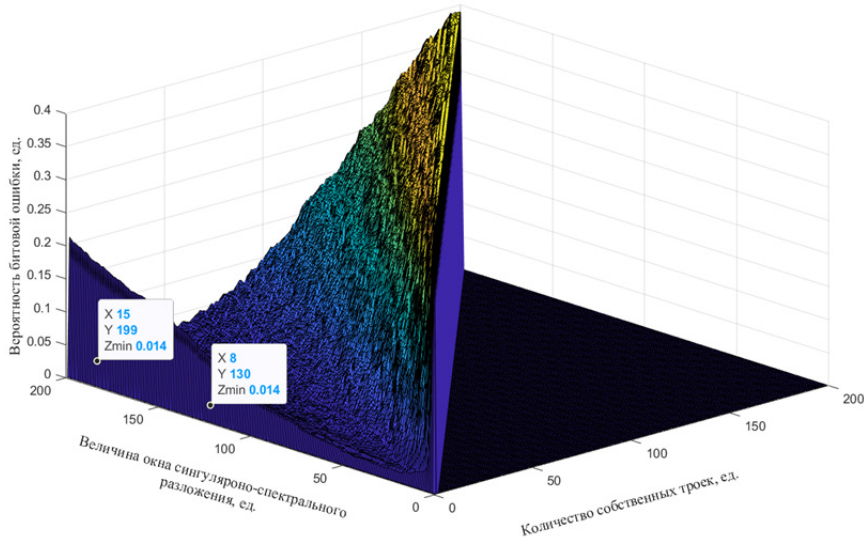


Рис. 4. Результаты оценивания вероятности битовой ошибки при отношении сигнал/шум, равном  $0$  дБ

Рекомендуемые параметры алгоритма восстановления ТМИ по критерию минимума вероятности битовой ошибки на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи сигнала для заданных условий помеховой обстановки, полученные по результатам моделирования, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальные параметры алгоритма восстановления ТМИ

Отношение сигнал/шум, дБ	Рекомендуемое количество собственных троек, ед.	Рекомендуемая величина окна сингулярно-спектрального разложения, ед.
$-4$	5–7	145–150
$-3$	5–7	145–150
$-2$	7–10	145–150
$-1$	7–10	120–150
$0$	5–15	120–150
$1$	4–15	60–150

Таким образом, по результатам моделирования установлено, что для обеспечения низкой вероятности битовой ошибки, влияющей на достоверность ТМИ, необходимо использо-



вать незначительное количество собственных троек, изменяющихся в пределах от 5 до 15, а увеличение размерности окна сингулярно-спектрального разложения более 150 дискретных отсчетов не приводит к снижению вероятности битовой ошибки.

### *Анализ результатов моделирования и оценивания оптимальных параметров алгоритма восстановления телеметрической информации*

Для оценивания целевого эффекта от применения предложенного научно-методического аппарата восстановления ТМИ на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа и поиска оптимальных параметров его применения проведено имитационное моделирование процессов восстановления ТМП. На рис. 5 представлен исходный неискаженный ТМП, сформированный бортовой радиотелеметрической системой.

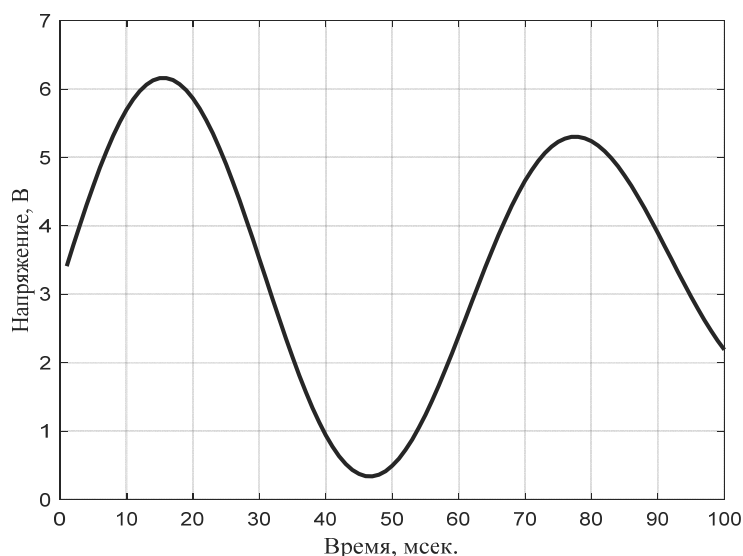


Рис. 5. Исходный ТМП

На рис. 6 и 7 представлены результаты восстановления ТМП с использованием алгоритма восстановления ТМИ на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи сигнала, при аналогичных условиях помеховой обстановки, с учетом выбора неоптимальных и оптимальных параметров восстановления.

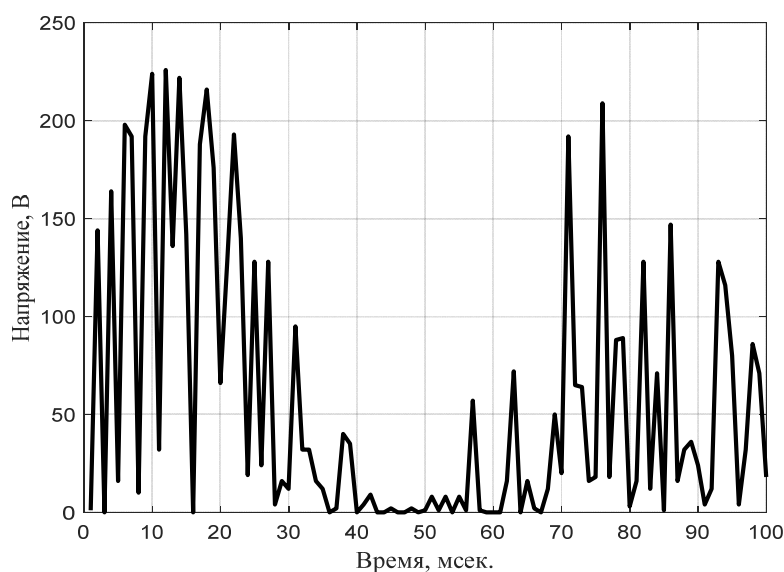


Рис. 6. Результаты восстановления ТМП с использованием метода сингулярно-спектрального анализа ( $q = 0$  дБ,  $X_c = 100$ ,  $L = 130$ )

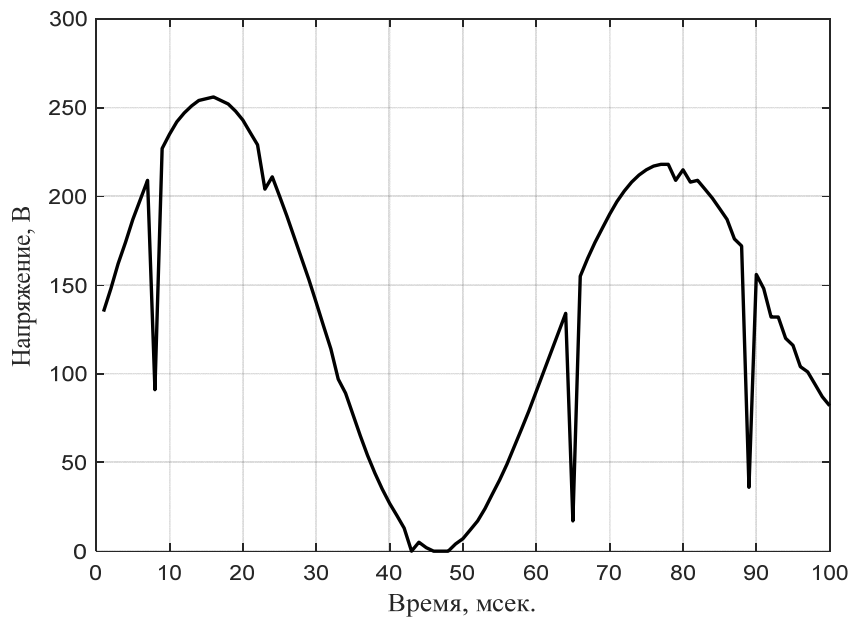


Рис. 7. Результаты восстановления ТМП с использованием метода сингулярно-спектрального анализа ( $q = 0$  дБ,  $X_c = 8$ ,  $L = 130$ )

Степень достоверности представления ТМП, оцениваемая в соответствии с выражением (11), составляет в первом случае 37 %, а во втором случае – 90 %.

Таким образом, оптимальный выбор параметров алгоритма восстановления ТМИ на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи сигнала позволит обеспечить высокую степень достоверности представления ТМП.

### Заключение

Применение перспективных технологий восстановления ТМИ, основанных на обработке и анализе додетекторной записи группового телеметрического сигнала, позволяет внедрить сложные итеративные алгоритмы восстановления, реализуемые в режиме отложенного времени. В частности, использование алгоритма восстановления ТМИ на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи сигнала позволяет существенно повысить степень достоверности представления ТМИ. При этом для эффективного применения данного алгоритма необходимо выбирать оптимальные значения величины окна сингулярно-спектрального разложения и количества собственных троек, используемых при восстановлении временного ряда. Для низких отношений сигнал/шум оптимальными значениями количества собственных троек являются значения в пределах от 5 до 15, а длины окна сингулярно-спектрального разложения – от 120 до 150 дискретных отсчетов.

### Список литературы

1. Назаров А. В., Козырев Г. И., Лоскутов А. И. [и др.] Современная телеметрия в теории и на практике. СПб. : Наука и техника, 2007. 667 с.
2. Воронцов В. Л. Методы разнесенного приема телеметрической информации и условия их применения в процессе развития телеметрического комплекса космодрома : монография. 2-е изд., перераб. и доп. Набережные Челны : Изд-во Камской гос. инженер.-эконом. акад., 2009. 284 с.
3. Дуников А. С., Бянкин А. А., Обрученков В. П., Митронин Р. В. Алгоритм адаптивного управления додетекторной записью в наземных приемно-регистрирующих станциях телеметрической информации с использованием сигнала автоматической регулировки усиления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 12. С. 7–19.
4. Емельянов Л. Я., Лялюк А. И., Рогожкин А. В., Храмов Е. А. О системах обработки сигналов некогерентного рассеяния на видео- и промежуточной частотах // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». 2013. № 28. С. 38–45.
5. Дуников А. С., Бянкин А. А., Митронин Р. В. Алгоритм восстановления телеметрической информации на основе применения метода сингулярно-спектрального анализа додетекторной записи сигнала // Инфор-

мационно-измерительные и управляющие системы. 2020. Т. 18, № 5. С. 20–34. doi: 10.18127/j20700814-202005-03

6. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория / под ред. А. Н. Колмогорова. М. : Мир, 1980. 536 с.

### References

1. Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Loskutov A.I. [et al.] *Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike* = Modern telemetry in theory and practice. Saint-Petersburg: Nauka i tekhnika, 2007:667. (In Russ.)
2. Vorontsov V.L. *Metody raznesennogo priema telemetricheskoy informatsii i usloviya ikh primeneniya v protsesse razvitiya telemetricheskogo kompleksa kosmodroma: monografiya. 2-e izd., pererab. i dop.* = Methods of distributed reception of telemetric information and conditions of their application in the process of development of the telemetric complex of the cosmodrome: monograph. 2nd ed., revised and expanded. Naberezhnye Chelny: Izd-vo Kamskoy gos. inzhener.-ekonom. akad., 2009:284. (In Russ.)
3. Dunikov A.S., Byankin A.A., Obruchenkov V.P., Mitronin R.V. Algorithm for adaptive control of pre-detection recording in ground-based receiving and recording stations of telemetric information using an automatic gain control signal. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* = Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2019;12:7–19. (In Russ.)
4. Emel'yanov L.Ya., Lyalyuk A.I., Rogozhkin A.V., Khramov E.A. On systems for processing incoherent scattering signals at video and intermediate frequencies. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskiy politekhnicheskii institut»* = Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". 2013;28:38–45. (In Russ.)
5. Dunikov A.S., Byankin A.A., Mitronin R.V. Algorithm for restoring telemetric information based on the use of the method of singular-spectral analysis of the pre-detector signal recording. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* = Information-measuring and control systems. 2020;18(5):20–34. doi: 10.18127/j20700814-202005-03. (In Russ.)
6. Brillindzher D. *Vremennye ryady. Obrabotka dannykh i teoriya* = Time series. Data processing and theory. Moscow: Mir, 1980:536. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Артём Сергеевич Дуников

кандидат технических наук,  
старший инженер отдела,  
Генеральный штаб Вооруженных сил РФ  
(Россия, г. Москва, Фрунзенская набережная, 22)  
E-mail: artem.sever1@yandex.ru

#### Artem S. Dunikov

Candidate of technical sciences,  
senior engineer of the department,  
General Staff of the Armed Forces  
(22 Frunzenskaya embankment, Moscow, Russia)

#### Александр Александрович Бянкин

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры телеметрических систем,  
комплексной обработки и защиты информации,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: aab51@mail.ru

#### Aleksandr A. Byankin

Candidate of technical sciences, associate professor,  
professor of sub-department of telemetry systems,  
integrated processing and protection  
of information,  
Military Space Academy  
named after A. F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

#### Эдуард Аркадьевич Бардаев

доктор технических наук, профессор, референт,  
Генеральный штаб Вооруженных сил РФ  
(Россия, г. Москва, Фрунзенская набережная, 22)  
E-mail: aab51@mail.ru

#### Eduard A. Bardaev

Doctor of technical sciences, professor, assistant,  
General Staff of the Armed Forces  
(22 Frunzenskaya embankment, Moscow, Russia)

УДК 681.321

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-5

## НАВИГАЦИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

*И. Н. Урваев*

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

iurvaev@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования в данной работе является система навигации для мобильного робота-спасателя, предназначенного для поиска пострадавших людей, находящихся под обломками разрушенных конструкций. Предметом исследования являются методы локализации и построение карты неизвестной местности. Целью исследования является поиск наиболее универсального и точного способа навигации для управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями. *Материалы и методы.* Для решения поставленных задач в работе использовались методы лазерной дальнометрии и SLAM-методы для локализации и построения карты местности. *Результаты.* Предложен алгоритм управления системой навигации мобильного робота, использующий метод лазерной дальнометрии для сканирования окружающего пространства. Местоположение робота определяется в системе локальных координат, связанных с исходным положением робота, так как априорная информация о его положении в пространстве отсутствует. Навигационная система робота самостоятельно строит карту его передвижения. *Выводы.* Предложенный способ навигации мобильного робота на основе лидара позволяет построить карту пространства, структура которого заранее неизвестна, и определить позицию робота на ней. Необходимость использования жесткой логики системы навигации снижает маневренность и скорость передвижения мобильного робота, поэтому для оптимизации траектории движения целесообразно применять технологии искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** мобильный робот, система навигации, лазерный дальномер, сканирующий лидар, карта местности, динамические препятствия

**Для цитирования:** Урваев И. Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 44–51. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-5

## MOBILE ROBOT NAVIGATION BASED ON LASER RANGE METHODS

*I.N. Urvaev*

Penza State University, Penza, Russia

iurvaev@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The object of research in this work is a navigation system for a mobile rescue robot designed to search for injured people under the rubble of destroyed structures. The subject of the research is localization methods and building a map of an unknown area. The aim of the study is to find the most versatile and accurate navigation method for controlling the movement of a mobile robot in an environment with dynamic obstacles. *Materials and methods.* To solve the set tasks, the work used the methods of laser ranging and SLAM-methods for localization and building a map of the area. *Results.* An algorithm for controlling a navigation system of a mobile robot is proposed using the method of laser ranging for scanning the surrounding space. The location of the robot is determined in a system of local coordinates associated with the initial position of the robot, since there is no a priori information about its position in space. The robot's navigation system independently builds a map of its movement. *Conclusions.* The proposed lidar-based navigation method for a mobile robot makes it possible to construct a map of space, the structure of which is unknown in advance, and to determine the position of the robot on it. The need to use the rigid logic of the navigation system reduces the maneuverability and speed of movement of a mobile robot, therefore, to optimize the trajectory of movement, it is advisable to use artificial intelligence technologies.

**Keywords:** mobile robot, navigation system, laser range finder, scanning lidar, terrain map, dynamic obstacles

**For citation:** Urvaev I.N. Mobile robot navigation based on laser range methods. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:44–51. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-5

© Урваев И. Н., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

### *Введение*

В настоящее время практически во всех развитых промышленных странах активно ведутся разработки мобильных роботов. Мобильный робот – это устройство, которое может самостоятельно передвигаться в пространстве и решать поставленные перед ним задачи с высокой степенью автономии. В создании мобильных роботов, прежде всего, заинтересованы военные и различные службы безопасности, для которых роботы могут заменить людей в сложных и опасных для жизни условиях. Все больший интерес для людей представляют не только промышленные мобильные роботы, но и роботы, созданные как для помощи людям – роботы-пылесосы, роботы-поводыри, так и для развлечения – роботы-собаки, квадрокоптеры [1].

Несмотря на значительный прогресс в области робототехники, основной проблемой создания таких устройств является навигация. Бортовая система управления робота должна уметь строить маршрут, управлять параметрами движения, адекватно интерпретировать поступающую от датчиков информацию о состоянии окружающей среды и отслеживать собственные координаты в сложной помеховой обстановке.

Существующие навигационные системы достаточно хорошо проработаны для применения в индустриальной сфере, где среда детерминирована и является статической. Для работы в незнакомой среде используемые алгоритмы навигации либо не обеспечивают достаточную точность и надежность локализации робота, либо требуют значительных вычислительных ресурсов. Последнее сильно сказывается на массогабаритных размерах, а также на потреблении энергии и, как следствие, времени на автономную работу [2].

Целью исследования является поиск наиболее универсального и точного способа навигации для управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями.

### *Материалы и методы*

В настоящее время существует три основных схемы навигации робота.

Глобальная навигация – определение абсолютных координат робота при движении по длинным маршрутам. Используется GPS, ГЛОНАСС. Обладает высокой точностью (погрешность 1–3 м). Недостаток – невозможность использования в замкнутой среде.

Локальная навигация – определение текущего положения робота относительно некоторой точки, обычно стартовой точки. Актуально для роботов, выполняющих задания в пределах заранее известной области. Недостаток – низкая точность (погрешность может достигать 150 м).

Персональная навигация – определение роботом частей собственной конструкции и взаимодействие с ближайшими объектами, что актуально для роботов с манипуляторами на борту, например, использование энкодеров, ориентация по меткам, движение вдоль линии и т.п. Недостаток – отсутствие гибкости системы.

Наиболее перспективной идеей является хранение в памяти робота полной карты местности. Лучший результат дают трехмерные карты, но их хранение и обработка бортовой системой управления роботом требуют больших вычислительных ресурсов. Задача построения карты заключается в хранении описания окружающей среды, чтобы в будущем робот мог определить свое местоположение на карте. Эта карта используется для планирования возможной траектории движения или выбора наиболее оптимальной позиции для захвата какого-либо объекта [3].

Анализ методов и средств навигации мобильных роботов показал, что оптимальным методом для построения карты маршрута является сканирующий лазерный дальномер. Судя по многим работам в области навигации мобильных роботов, использование лазерного дальномера позволяет достичь наиболее высокой точности локализации.

Основой лазерного дальномера является лидар (LIDAR англ. *Light Identification Detection and Ranging* – световое обнаружение и определение дальности). Лидар – это устройство, реализующее технологию получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью электромагнитного излучения. Принцип работы лидара приведен на рис. 1 [4].

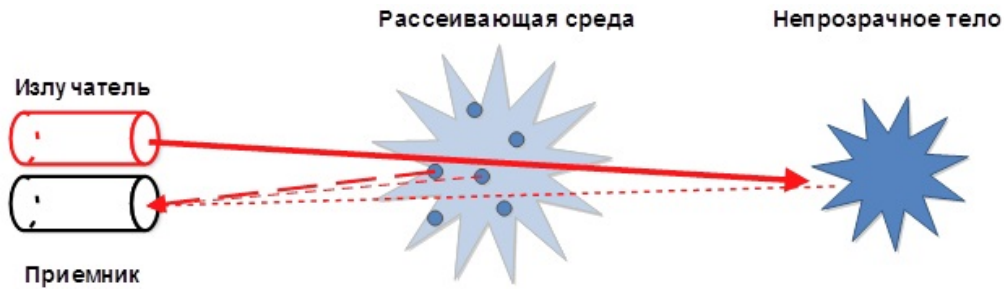


Рис. 1. Принцип действия лидара

Направленный луч от излучателя отражается от цели, возвращается к приемнику. Расстояние до точки поверхности объекта можно рассчитать как

$$L = 0,5ct,$$

где  $c$  – скорость света;  $t$  – полное время прохождения светом пути до точки отражения и обратно;  $L$  – искомое расстояние до точки отражения [5].

В табл. 1 приведены данные, показывающие зависимость времени отклика от расстояния до цели.

Таблица 1

Зависимость времени отклика от расстояния до цели

Расстояние до цели	1 м	10 м	100 м	1 км	10 км	100 км
Время отклика	6,7 нс	67 нс	0,67 мкс	6,7 мкс	67 мкс	0,67 с

Очевидно, что из-за высокой скорости света  $c$  время отклика незначительно, поэтому оборудование, необходимое для измерения этого малого промежутка времени, должно работать очень быстро.

Структура лидара приведена на рис. 2.

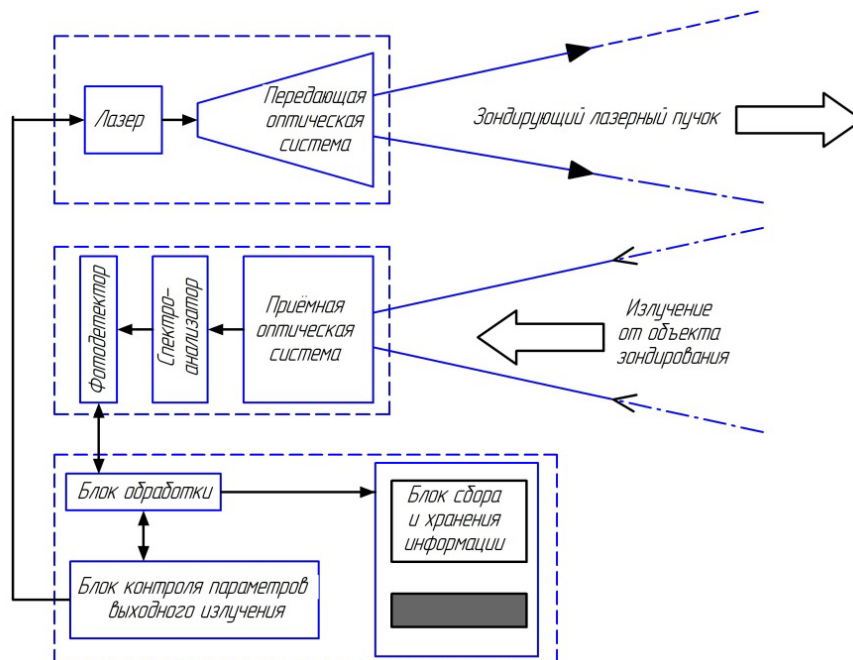


Рис. 2. Структура лидара

Большинство лидаров состоят из трех частей: передатчика, приемника и системы управления. Передатчик содержит источник излучения – лазер и оптическую систему для формирования выходного лазерного пучка, т.е. для управления размером выходного пятна и расходи-

мостью пучка. В абсолютном большинстве конструкций излучателем служит лазер, формирующий короткие импульсы света высокой мгновенной мощности (рис. 3).

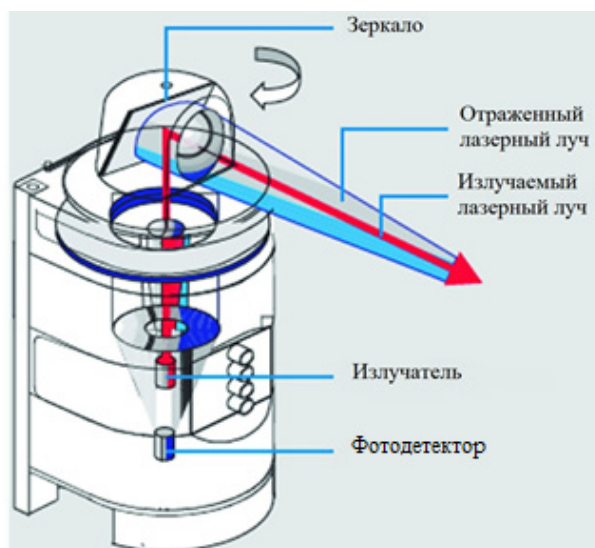


Рис. 3. Типовая конструкция лидара

Периодичность следования импульсов или модулирующая частота выбираются так, чтобы пауза между двумя последовательными импульсами была не меньше, чем время отклика от обнаруживаемых целей (которые могут физически находиться дальше, чем расчетный радиус действия прибора). Приемник состоит из объектива, спектрального и/или пространственного фильтра, поляризационного элемента и фотоприемника. Излучение, отраженно-рассеянное от исследуемого объекта, концентрируется приемной оптикой, а затем проходит через анализатор спектра. Этот прибор служит для выделения интервала длин волн, в котором проводятся наблюдения, и, следовательно, для отсечки фонового излучения на других длинах волн. Анализатор может представлять собой либо сложный, тщательно настраиваемый моно- или полихроматор, либо набор узкополосных фильтров, включая фильтр отсечки излучения на длине волны лазерного передатчика [6].

Излучатель и приемный блок могут быть далеко разнесены друг от друга или выполнены в едином блоке. Оси излучателя и приемника могут быть совмещены (коаксиальная схема) или разнесены (биаксиальная схема) [7].

Система управления лидара выполняет следующие задачи:

- управление режимом работы лидара;
- управление частотой зондирующего излучения лазера;
- измерение энергии излучения в выходящем и принимаемом двухчастотном лазерном пучке на обеих частотах;
- обработка результатов, т.е. получение спектральных характеристик атмосферы, определение наличия и концентраций примесей по имеющимся в базе данных компьютера «спектральным портретам» молекул;
- управление системой наведения лидара на исследуемый объект [8].

### **Результаты**

Объектом исследования в данной работе является система навигации для мобильного робота-спасателя, предназначенного для поиска пострадавших людей, находящихся под обломками разрушенных конструкций. Проблема навигации таких роботов заключается в позиционировании его в пространстве при движении в динамической недетерминированной среде.

В общем виде задачу навигации можно сформулировать следующим образом. Имеется некоторое пространство, в котором расположен мобильный робот, оснащенный лазерным дальномером. Задана целевая точка, которую робот должен достичь для выполнения некоторой задачи. Необходимо определить закон управления мобильным роботом, который переве-

дет его из начального положения в целевую точку. На первый взгляд, задача кажется простой, однако существует целый ряд проблем, условий и ограничений:

1. Робот должен определять свое положение в пространстве, чтобы позиционироваться относительно целевой точки.
2. Необходимо обходить статические препятствия, для чего нужно строить карту местности.
3. Построению карты мешают динамические препятствия.
4. Движение робота к целевой точке должно быть оптимальным по времени.

Решение задачи навигации мобильного робота в пространстве требует одновременного решения проблемы локализации и построения карты или ее дополнения вновь обнаруженными объектами. В настоящее время решается либо задача локализации по имеющейся карте, либо задача построения карты при известной траектории робота. Общего подхода, решающего эти задачи одновременно с требуемой точностью и вне зависимости от особенностей окружения на данный момент не существует. К тому же решение поставленных задач заметно усложняется из-за того, что навигационные датчики имеют погрешности, следовательно, точно определить траекторию движения не представляется возможным.

Было принято решение представлять местоположение робота в системе локальных координат, связанных с исходным положением робота, так как априорная информация о его положении в пространстве отсутствует. Робот самостоятельно строит карту своего передвижения.

В робототехнике для навигации и позиционирования роботов обычно используются SLAM-методы (одновременная локализация и построение карты – от англ. *simultaneous localization and mapping*). SLAM-методы позволяют построить карту пространства, структура которого заранее неизвестна, и определить позицию робота на ней. Использование SLAM-методов позволяет оптимизировать траекторию движения робота, но только в условиях статического пространства. На рис. 4 приведены карты, построенные системой навигации робота до применения SLAM-методов (рис. 4,а) и после (рис. 4,б) [9].

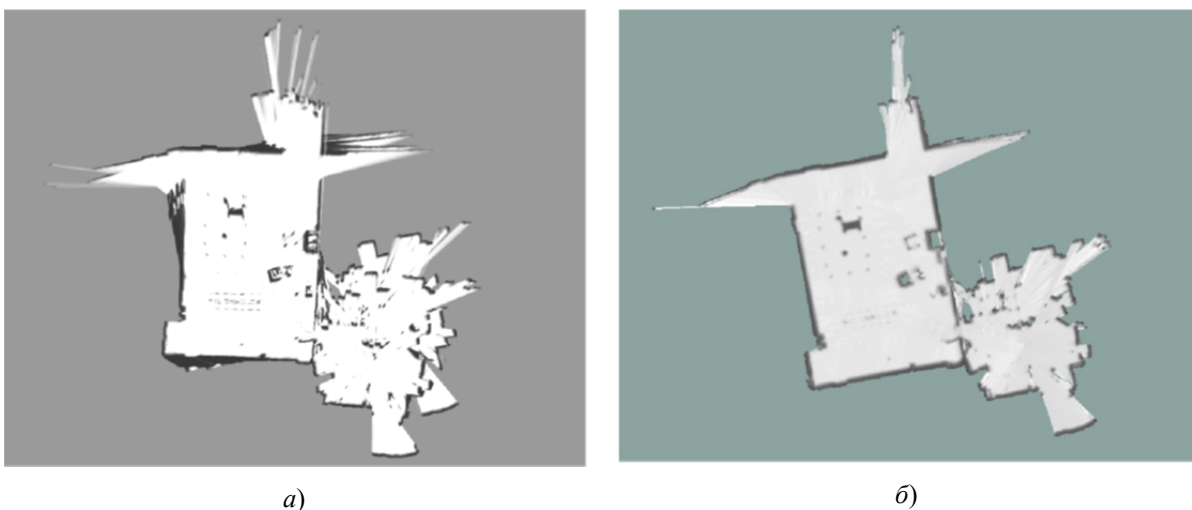


Рис. 4. Оптимизация карты местности с помощью SLAM-методов:  
а – до применения («сырые данные»); б – после обработки одного из SLAM-методов

В динамической среде движение препятствий нельзя рассчитать заранее, так как среда в общем случае является недетерминированной, поэтому невозможно предварительно построить маршрут, который позволит двигаться безопасно. Чтобы избежать столкновений с динамическими препятствиями, необходимо определять текущее их положение и предсказывать траекторию движения. Тогда можно двигаться вдоль спланированной траектории, отклоняясь от нее в нужный момент, чтобы совершить маневр для обхода препятствия. Поэтому адекватным решением задачи движения в динамической среде является учет перемещения препятствий непосредственно в контуре управления мобильным роботом [10].

В работе предлагается алгоритм работы системы навигации, позволяющий учесть динамику движения робота, положение препятствий, а также избежать столкновения с ними. Алгоритм управления системы навигации робота-спасателя представлен на рис. 5.



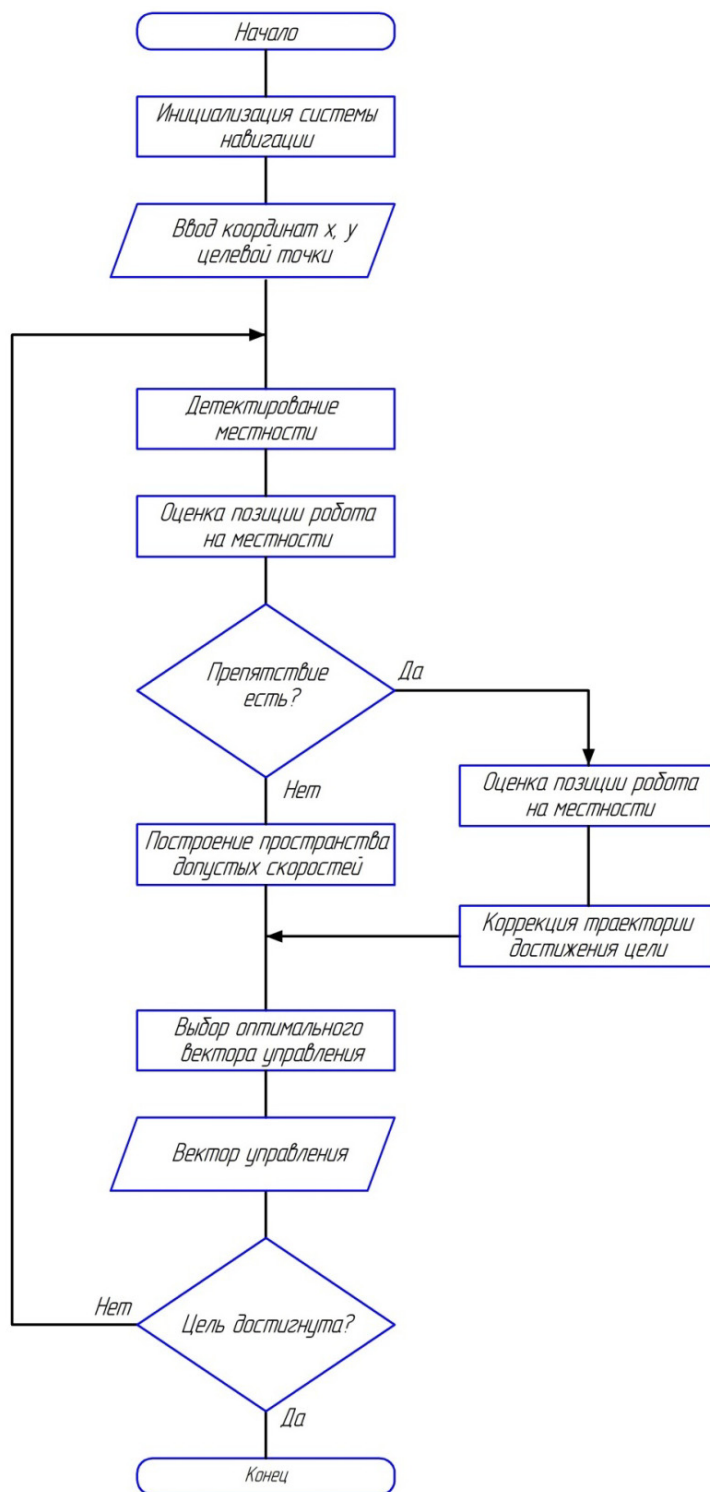


Рис. 5. Алгоритм управления системы навигации робота-спасателя

Работа предложенной системы навигации робота-спасателя заключается в следующем. На первоначальном этапе лидар формирует трехмерное облако точек, обозначающее окружающее робот пространство. Полученные данные передаются в систему навигации робота, где предварительно строится карта местности и карта препятствий. Определив позицию управляемого объекта, система навигации переходит к обновлению карты и карты препятствий, т.е. на каждом шаге алгоритма система навигации строит карту препятствий и местоположения управляемого объекта относительно этой карты. Поступаемые с лидара данные позволяют системе навигации оптимизировать вектор управления. Процесс управления кончается, когда робот достигнет целевой точки.

### Заключение

Предложенный способ навигации мобильного робота на основе лидара позволяет построить карту пространства, структура которого заранее неизвестна, и определить позицию робота на ней. Необходимость использования жесткой логики системы навигации снижает маневренность и скорость передвижения мобильного робота, поэтому для оптимизации траектории движения целесообразно применять технологии искусственного интеллекта.

### Список литературы

1. Войтович, И. Д., Корсунский В. М. Интеллектуальные сенсоры : учеб. пособие. М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2009. С. 51–53. ISBN 978-5-9963-0124-9
2. Дергачев, В. В., Карташов О. О. Способы оценки и снижения вычислительной сложности алгоритмов принятия решений в задачах одновременной локализации и картографирования // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4598](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4598)
3. Кучерский, Р. В., Манько С. В. Алгоритмы локальной навигации и картографии для бортовой системы управления автономного мобильного робота // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 3. С. 13–22. ISSN 1999-9429.
4. Endres F., Hess J., Engelhard N. [et al.]. An evaluation of the RGB-D SLAM system // Robotics and Automation (ICRA) : 2012 IEEE International Conference. 2012. P. 1691–1696.
5. Lu F., Milios E. Robot pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 1997. Vol. 18, № 3. P. 249–275.
6. Park J., Lee S., Park J. Correction robot pose for SLAM based on Extended Kalman Filter in a rough surface environment // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2009. Vol. 6, № 2. P. 67–72.
7. Eliazar A., Parr R. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks // Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). 2003. P. 1135–1142.
8. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22, № 11. P. 1330–1334.
9. Steux B., Hanzaoui O. EI. TinySLAM: A SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program // Control Automation Robotics & Vision (ICARCV) : 11th International Conference. 2010. P. 1975–1979.
10. Garrido-Jurado, S., Munos-Salinas R., Madrid-Cuevas F. J., Marin-Jimenez M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion // Pattern Recognition. 2014. Vol. 47, № 6. P. 2280–2292.

### References

1. Voytovich I. D., Korsunskiy V.M. *Intellektual'nye sensory: ucheb. posobie = Smart sensors: a tutorial*. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2009:51–53. ISBN 978-5-9963-0124-9. (In Russ.)
2. Dergachev V.V., Kartashov O.O. Methods for evaluating and reducing the computational complexity of decision-making algorithms in simultaneous localization and mapping problems. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2017;4. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4598](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4598) (In Russ.)
3. Kucherskiy R.V., Man'ko S.V. Algorithms of local navigation and cartography for the onboard control system of an autonomous mobile robot. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = News of the Southern Federal University. Technical sciences*. 2012;3:13–22. ISSN 1999-9429. (In Russ.)
4. Endres F., Hess J., Engelhard N. [et al.]. An evaluation of the RGB-D SLAM system. *Robotics and Automation (ICRA): 2012 IEEE International Conference*. 2012:1691–1696.
5. Lu F., Milios E. Robot pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 1997;18(3):249–275.
6. Park J., Lee S., Park J. Correction robot pose for SLAM based on Extended Kalman Filter in a rough surface environment. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2009;6(2):67–72.
7. Eliazar A., Parr R. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks. *Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*. 2003:1135–1142.
8. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000;22(11):1330–1334.
9. Steux B., Hanzaoui O.EI. TinySLAM: A SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program. *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV): 11th International Conference*. 2010:1975–1979.
10. Garrido-Jurado, S., Munos-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marin-Jimenez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 2014;47(6):2280–2292.

*Информация об авторах / Information about the authors***Илья Николаевич Урваев**

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

**И'ya N. Urvaev**

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

УДК 004.627

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-6

## АДАПТИВНОЕ СЖАТИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Б. Я. Лихтциндер<sup>1</sup>, Ю. О. Бакай<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия

<sup>1</sup>lix@psuti.ru, <sup>2</sup>ov.bakai@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Топология сети изменяется, сеть становится самоорганизующейся и для ее функционирования требуются новые специальные протоколы. Рассматривается понятие «беспроводные сенсорные сети» (БСС). *Материалы и методы.* Предложены методы сжатия данных в беспроводных сенсорных сетях. Описываются методы и алгоритмы сжатия измерительных данных. *Результаты.* Приведены пять категорий методов, включая сжатие на основе цепочек, сжатие на основе изображений, кодирование с распределенным источником, сжатие на основе агрегации данных. Наиболее подробно рассмотрен адаптивный метод сжатия. Выявлены особенности представляемых алгоритмов. *Выводы.* Показана эффективность применения алгоритма "дырявое ведро" для адаптации сжатия. Рассмотрена структура, реализующая указанный алгоритм. Показаны преимущества введения адаптации при сжатии данных в БСС.

**Ключевые слова:** сенсорные сети, сжатие данных, адаптация, алгоритмы, датчики

**Для цитирования:** Лихтциндер Б. Я., Бакай Ю. О. Адаптивное сжатие измерительных данных в беспроводных сенсорных сетях // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 52–57. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-6

## ADAPTIVE COMPRESSION OF MEASURED DATA IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

B.Ya. Likhttsinder<sup>1</sup>, Yu.O. Bakay<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Volga Region State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

<sup>1</sup>lix@psuti.ru, <sup>2</sup>ov.bakai@gmail.com

**Abstract.** *Background.* The network topology is changing, the network is becoming self-organising and new special protocols are required for its operation. The paper discusses the concept of wireless sensor networks (WSNs). *Materials and methods.* The paper proposes methods of data compression in wireless sensor networks (WSN). It describes methods and algorithms of sensing data compression. *Results.* Five categories of compression methods are presented, including chaining-based compression, image-based compression, distributed-source coding, and aggregation-based compression. The adaptive compression method suggested by the author is discussed in details. The peculiarities of the presented algorithms are pointed out. *Conclusions.* The effectiveness of application of the "hole-bucket" algorithm for adaptive compression is shown. The structure implementing the mentioned algorithm is considered. The advantages of introducing adaptation in data compression in WSN are shown.

**Keywords:** sensor networks, data compression, adaptation, algorithms, sensors

**For citation:** Likhttsinder B.Ya., Bakay Yu.O. Adaptive compression of measured data in wireless sensor networks. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:52–57. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-6

### Введение

Информационно-измерительные системы существуют уже много лет. Различные сенсорные устройства, датчики подключались к центральному обрабатываемому устройству, как терминальные устройства подключались к центральной ЭВМ. Информация обрабатывалась централизованно и выдавалась потребителю. Датчики не могли размещаться на удаленном

© Лихтциндер Б. Я., Бакай Ю. О., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

расстоянии от центральной ЭВМ и подключались с помощью специальных соединительных кабелей. Информация передавалась в аналоговом виде и преобразовывалась в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который поочередно подключался к сенсорным устройствам. АЦП были громоздкие и весьма дорогие. Потеря точности за счет передачи аналоговых сигналов послужила причиной разработки малогабаритных АЦП, которые устанавливались вблизи датчиков и передавали информацию в цифровой форме. Развитие цифровой элементной базы позволило осуществить такой переход. Одновременно уменьшались размеры цифровых обрабатывающих устройств и увеличивалась их вычислительная мощность, появились малогабаритные контроллеры. Создание больших интегральных схем (БИС) с высоким уровнем интеграции позволило совместить контроллерную обработку информации от датчиков с самим измерительным процессом, встраивая вычислительные мощности в измерительные преобразователи. Появились «умные» сенсорные устройства, адаптирующиеся к изменению условий измерений. Уменьшились не только физические размеры устройств цифровой обработки, но уменьшалось также их энергопотребление, увеличивался срок непрерывной работы с автономным малогабаритным источником энергии. Низкая стоимость интеллектуальных сенсорных устройств привела к широкому их распространению. Информация уже собирается от сотен и даже тысяч таких устройств, и возникли проблемы с их подключением к устройствам сбора информации. Все шире начинают создаваться сети, передающие информацию по радиоканалам с использованием стандартных протоколов. В указанных целях широко используются Wi-Fi-сети, характеристики которых позволяют передавать информацию на расстояние более одного километра. Однако стандартные протоколы оказались слишком громоздкими. Для большинства приложений не требовалось высоких скоростей передачи, однако требовалось большое количество таких узлов. Размещение датчиков на больших площадях потребовало бы увеличения мощности передатчиков, что невозможно из-за ограниченности их источников энергии. Решить проблему позволило применение MESH сетей, когда информация транслируется промежуточными приемопередатчиками. При этом приемопередатчики конструктивно объединяются с датчиками в один узел. Топология сети изменяется, сеть становится самоорганизующейся и для ее функционирования потребовались новые специальные протоколы. Так появилось понятие «беспроводные сенсорные сети» (БСС) – сети, объединяющие сенсорные преобразователи и средства передачи измерительной информации и информации управления.

### *Сжатие данных в БСС*

Беспроводная сенсорная сеть состоит из одного или нескольких удаленных приемников и большого количества сенсорных узлов. Каждый сенсорный узел представляет собой небольшое беспроводное устройство, которое может непрерывно собирать информацию и сообщать данные в приемник через схему множественной маршрутизации с несколькими переходами [1]. БСС предоставляют новую возможность для повсеместного компьютерного и контекстно-ориентированного мониторинга физических сред. Они обычно развертываются в областях, представляющих интерес для наблюдения специфических явлений или объектов. Практические применения БСС включают: мониторинг животных, предприятий сельского хозяйства, здравоохранение, надзор и интеллектуальные здания [2–6]. Поскольку узлы датчиков обычно питаются от батарей и многие приложения БСС нацелены на долгосрочный мониторинг окружающей среды, то важной проблемой является сохранение энергии сенсорных узлов с целью продления срока их службы. Существует два общих решения экономии энергии сенсорных узлов. Одним из решений является использование избыточности узлов, выбирая для активизации те подмножества сенсорных узлов, которые имеют наибольший запас энергии по сравнению с другими [7–9]. Выбранный поднабор активных сенсорных узлов должен охватывать всю область мониторинга и поддерживать сетевое подключение. Другими словами, эти активные узлы датчиков должны следить за тем, чтобы сеть по-прежнему функционировала нормально. Путем выбора различных подмножеств сенсорных узлов, которые будут активны по очереди, мы можем помешать некоторым узлам датчиков потреблять слишком много энергии, продлить срок службы сети. Однако часто избыточность узла использована быть не может (например, из-за занятости сети [10, 11] или из-за прерывания). Альтернативным решением является уменьшение количества данных, отправляемых датчиками, поскольку передача

является одной из наиболее энергозатратных операций сенсорных узлов. Такое решение особенно полезно, когда узлы датчиков должны регулярно сообщать данные своих измерений приемнику в течение длительного промежутка времени. Чтобы уменьшить количество передаваемых данных, необходимо сжать их внутри сети. В зависимости от возможности восстановления данных можно классифицировать схемы сжатия данных по трем категориям: без потерь, с потерями и необратимое сжатие. Сжатие без потерь означает, что после выполнения операции декомпрессии мы можем получить точно такие же данные, что и перед выполнением операции сжатия. Кодирование Хаффмана [12] является одним из типичных примеров. Сжатие с потерями означает, что некоторые детализированные данные могут быть потеряны из-за операции сжатия. Большинство схем сжатия изображений и видео, таких как JPEG2000 [13], относятся к этой категории. Наконец, сжатие с потерями означает, что операция сжатия необратима.

Методы сжатия данных в БСС могут быть классифицированы по пяти категориям:

1. Методы сжатия на основе построения префиксных кодов рассматривают воспринимаемые данные как последовательность символов, а затем применяют к ним схемы сжатия, используемые для обработки текстовых данных. Унаследованные от этих методов способы сжатия на основе строк также могут обеспечивать сжатие без потерь.

2. Методы сжатия на основе изображений организуют БСС в иерархическую архитектуру, а затем применяют некоторые схемы сжатия изображений, такие как вейвлет-преобразование, чтобы обеспечить множественное разрешение воспринимаемых данных внутри сети. Некоторые незначительные характеристики таких данных могут быть потеряны из-за операций сжатия, и, таким образом, технология сжатия на основе изображения поддерживает сжатие с потерями.

3. Методы кодирования распределенных источников сжимают данные считывания внутри сети в соответствии с теоремой Слепяна – Вольфа и работой [14], которая доказывает, что два или более коррелированных потока данных могут быть закодированы независимо друг от друга и затем декодироваться совместно в приемнике со скоростью, соответствующей их совместной энтропии. Поэтому методы кодирования с распределенным источником могут поддерживать сжатие без потерь.

4. Методы сжатого зондирования показывают, что любые достоверно сжимаемые данные могут быть точно восстановлены из небольшого числа неадаптивных рандомизированных образцов линейной проекции. Таким образом, они могут использовать сжимаемость, не полагаясь на какие-либо предварительные знания или предположения об измеряемых данных. При вышеуказанном наблюдении методы сжатого зондирования могут обеспечить сжатие без потерь.

5. Методы агрегирования данных передают данные в приемник [15]. Поскольку из этих агрегированных данных не могут быть получены данные исходных измерений, сжатие методами агрегирования данных является необратимым. К таким методам относится рассматриваемый в этой статье метод адаптивного сжатия.

#### *Адаптивное сжатие*

Наиболее часто сжатие передаваемых данных осуществляется с помощью вейвлет-преобразований. Некоторые незначительные характеристики измеряемых данных могут быть потеряны из-за операций сжатия. Сущность предлагаемого нами метода заключается в том, что указанные потери (мгновенные отклонения реального процесса от восстановленного из сжатого процесса) анализируются, и при выходе анализируемого параметра отклонения за определенные установленные пределы начинает передаваться полная информация о процессе [16]. В качестве анализирующего алгоритма предлагается использовать известный алгоритм «дырявое ведро», широко применяющийся при анализе трафика сетей связи с коммутацией пакетов.

Рассмотрим работу указанного алгоритма на рис. 1. Измерительная информация, поступающая от сенсора, кодируется с помощью АЦП, и в виде цифровых отсчетов  $m_{ik}$  поступает на вход буферной памяти. Одновременно в памяти может находиться  $N$  отсчетов. При поступлении очередного отсчета наиболее ранний отсчет удаляется.

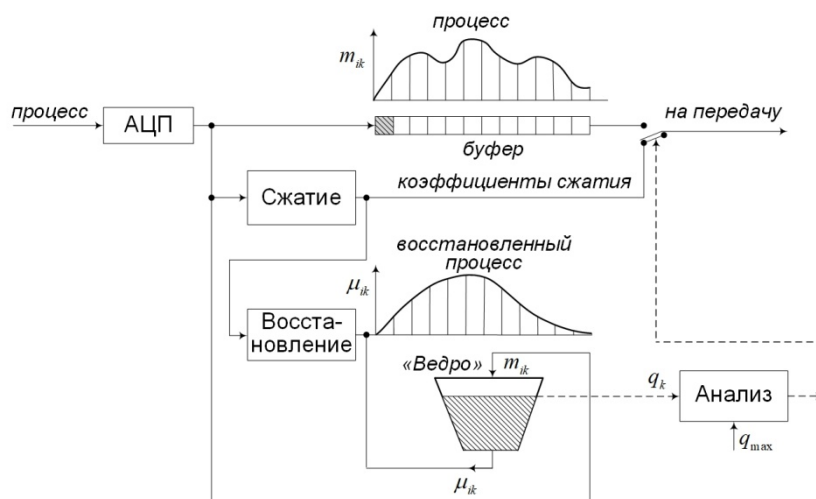


Рис. 1. Структурная схема адаптивного сжатия

Отсчеты также поступают на устройство сжатия. Коэффициенты, получаемые в результате сжатия процесса на данном цикле, поступают циклически на передачу. Одновременно отсчеты поступают на суммирующий вход обработки алгоритмом «дырявое ведро».

По коэффициентам, получаемым в результате «сжатия», производится восстановление процесса, результаты которого в виде отсчетов  $\mu_{ik}$  поступают на вычитающий вход обработки алгоритмом «дырявое ведро». Уровень «наполнения ведра»  $q_{ik}$  сравнивается с заданным максимальным значением  $q_{max}$ , и в случае превышения происходит переключение на передачу всех не сжатых данных о процессе из буферной памяти. Если в течение цикла превышение отсутствует, то на передачу поступают только коэффициенты, полученные в результате сжатия исходного процесса.

Способ сжатия с помощью вейвлет требует задержки передачи информации на интервал времени, равный длительности одного цикла, поскольку значения всех коэффициентов разложения могут быть получены лишь по завершению цикла. Если в сети производится циклический доступ методом TDMA [17], то рассмотренный способ сжатия можно считать оправданным. Если же используется метод случайного доступа, то может возникнуть задержка между моментом существенного отклонения процесса и моментом передачи информации об этом отклонении. В указанных случаях целесообразней использовать способ сжатия на основе прогнозирования.

### Заключение

Сенсорные узлы питаются от батарей, сохранение их энергии является основной проблемой БСС. Сжатие данных в сети помогает уменьшить количество измеряемых данных, которые сенсорные узлы должны регулярно сообщать приемнику, и значительно снизить потребление энергии. Адаптация алгоритма сжатия к постоянно изменяющимся во времени данным значительно повышает его эффективность. Предлагаемый алгоритм позволяет отслеживать текущие изменения и в случае значительных отклонений предоставляет информацию о предыстории контролируемого процесса.

### Список литературы

1. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A survey on sensor networks // IEEE Comm. Magazine. 2002. Vol. 40, № 8. P. 102–114.
2. Zhang P., Sadler C. M., Lyon S. A., Martonosi M. Hardware design experiences in ZebraNet // Proc. ACM Int'l Conf. Embedded Networked Sensor Systems. 2004. P. 227–238.
3. Tseng, Y. C., Wang Y. C., Cheng K. Y., Hsieh Y. Y. iMouse: an integrated mobile surveillance and wireless sensor system // Computer. 2007. Vol. 40, № 6. P. 60–66.
4. Wark T., Corke P., Sikka P. [et al.] Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks // IEEE Pervasive Computing. 2007. Vol. 6, № 2. P. 50–57.

5. Huang Y. M., Hsieh M. Y., Chao H. C. [et al.] Pervasive, secure access to a hierarchical sensor-based healthcare monitoring architecture in wireless heterogeneous networks // *IEEE J. Selected Areas in Comm.* 2009. Vol. 27, № 4. P. 400–411.
6. Yeh L. W., Wang Y. C., Tseng Y. C. iPower: an energy conservation system for intelligent buildings by wireless sensor networks // *Int'l J. Sensor Networks.* 2009. Vol. 5, № 1. P. 1–10.
7. Cardei M., Du D. Z. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization // *ACM Wireless Networks.* 2005. Vol. 11, № 3. P. 333–340.
8. Zou Y., Chakrabarty K. A distributed coverage- and connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks // *IEEE Trans. Computers.* 2005. Vol. 54, № 8. P. 978–991.
9. Zhao Q., Gurusamy M. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks // *IEEE/ACM Trans. Networking.* 2008. Vol. 16, № 6. P. 1378–1391.
10. Heo N., Varshney P. K. Energy-efficient deployment of intelligent mobile sensor networks // *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans.* 2005. Vol. 35, № 1. P. 78–92.
11. Wang Y. C., Hu C. C., Tseng Y. C. Efficient placement and dispatch of sensors in a wireless sensor network // *IEEE Trans. Mobile Computing.* 2008. Vol. 7, № 2. P. 262–274.
12. Nelson M., Gailly J. L. *The data compression book.* MIS Press, 1996. P. 541.
13. Taubman D. S., Marcellin M. W. *JPEG2000: fundamentals, standards and practice.* Kluwer Academic Publishers, 2002.
14. Haupt J., Bajwa W. U., Rabbat M., Nowak R. Compressed sensing for networked data // *IEEE Signal Processing Magazine.* 2008. Vol. 25, № 2. P. 92–101.
15. Голубничая Е. Ю. Агрегирование данных в беспроводных сенсорных сетях мониторинга // Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах : сб. докл. и тез. VIII Всерос. науч.-практ. конф. Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2017. С. 37–42.
16. Лихтциндер Б. Я. Интервальный метод анализа трафика мультисервисных сетей // Модели инфокоммуникационных систем: разработка и применение. Приложение к журналу ИКТ. 2011. Вып. 8. С. 101–152.
17. Голубничая Е. Ю. Применение детерминированного расписания TDMA в беспроводных сенсорных сетях // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций : XX Междунар. науч.-техн. конф., Оптические технологии в телекоммуникациях : XVI Междунар. науч.-техн. конф. : материалы конф. : в 2 т. Уфа : РИК УГАТУ, 2018. Т. 1. С. 135–137.

### References

1. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Comm. Magazine.* 2002;40(8):102–114.
2. Zhang P., Sadler C.M., Lyon S.A., Martonosi M. Hardware design experiences in ZebraNet. *Proc. ACM Int'l Conf. Embedded Networked Sensor Systems.* 2004:227–238.
3. Tseng, Y.C., Wang Y.C., Cheng K.Y., Hsieh Y.Y. iMouse: an integrated mobile surveillance and wireless sensor system. *Computer.* 2007;40(6):60–66.
4. Wark T., Corke P., Sikka P. [et al.]. Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks. *IEEE Pervasive Computing.* 2007;6(2):50–57.
5. Huang Y.M., Hsieh M.Y., Chao H.C. [et al.]. Pervasive, secure access to a hierarchical sensor-based healthcare monitoring architecture in wireless heterogeneous networks. *IEEE J. Selected Areas in Comm.* 2009;27(4):400–411.
6. Yeh L.W., Wang Y.C., Tseng Y.C. iPower: an energy conservation system for intelligent buildings by wireless sensor networks. *Int'l J. Sensor Networks.* 2009;5(1):1–10.
7. Cardei M., Du D.Z. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization. *ACM Wireless Networks.* 2005;11(3):333–340.
8. Zou Y., Chakrabarty K. A distributed coverage- and connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks. *IEEE Trans. Computers.* 2005;54(8):978–991.
9. Zhao Q., Gurusamy M. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Networking.* 2008;16(6):1378–1391.
10. Heo N., Varshney P.K. Energy-efficient deployment of intelligent mobile sensor networks. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans.* 2005;35(1):78–92.
11. Wang Y.C., Hu C.C., Tseng Y.C. Efficient placement and dispatch of sensors in a wireless sensor network. *IEEE Trans. Mobile Computing.* 2008;7(2):262–274.
12. Nelson M., Gailly J.L. *The data compression book.* MIS Press, 1996:541.
13. Taubman D.S., Marcellin M.W. *JPEG2000: fundamentals, standards and practice.* Kluwer Academic Publishers, 2002.
14. Haupt J., Bajwa W.U., Rabbat M., Nowak R. Compressed sensing for networked data. *IEEE Signal Processing Magazine.* 2008;25(2):92–101.



15. Golubnichaya E.Yu. Data aggregation in wireless sensor monitoring networks. *Problemy peredachi informatsii v infokommunikatsionnykh sistemakh: sb. dokl. i tez. VIII Vseros. nauch.-prakt. konf. = Problems of information transmission in infocommunication systems: sat. dokl. and tez. VIII All-Russian Scientific and practical conf.* Volgograd: Izd-vo VolGU, 2017:37–42. (In Russ.)
16. Likhttsinder B.Ya. Interval method for traffic analysis of multiservice networks. *Modeli infokommunikatsionnykh sistem: razrabotka i primenenie. Prilozhenie k zhurnalu IKT = Models of infocommunication systems: development and application. Appendix to the Journal of ICT.* 2011;8:101–152. (In Russ.)
17. Golubnichaya E.Yu. Applying a deterministic TDMA schedule to wireless sensor networks. *Problemy tekhniki i tekhnologii telekommunikatsiy: XX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Opticheskie tekhnologii v telekommunikatsiyakh: XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.: materialy konf.: v 2 t. = Problems of Telecommunications Engineering and Technology: XX International Scientific and Technical Journal. conf., Optical technologies in Telecommunications: XVI International Scientific and Technical Journal. conf.: materials of conf.: in 2 vol.* Ufa: RIK UGATU, 2018;1:135–137. (In Russ.)

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

#### **Борис Яковлевич Лихтциндер**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры сетей и систем связей,  
Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики  
(Россия, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23)  
E-mail: lixt@psuti.ru

#### **Boris Ya. Likhttsinder**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of sub-department of network  
and communication systems,  
Volga Region State University  
of Telecommunications and Informatics  
(23 L. Tolstogo street, Samara, Russia)

#### **Юлия Олеговна Бакай**

студентка,  
Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики  
(Россия, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23)  
E-mail: ov.bakai@gmail.com

#### **Yulia O. Bakai**

Student,  
Volga Region State University  
of Telecommunications and Informatics  
(23 L. Tolstogo street, Samara, Russia)

УДК 531.714.75

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-7

## НЕЗАВИСИМАЯ ПОВЕРКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПАРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

А. И. Нефедьев<sup>1</sup>, Д. И. Нефедьев<sup>2</sup>

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

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

<sup>1</sup>nefediev@rambler.ru, <sup>2</sup>ndi200106@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Для метрологических исследований актуальной проблемой является децентрализованная система поверки на основе использования самоверяемых автономных средств измерений. Таким образом, актуальной задачей является разработка автономно поверяемых термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения. *Проблема и решение.* Повышение точности измерения напряжения с помощью термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения сдерживает частотная погрешность добавочных резисторов. Особенно сильно это проявляется на высоких напряжениях. Для решения этой задачи были разработаны термоэлектрические компарирующие преобразователи напряжения на 500 и 1000 В, содержащие добавочные резисторы с тремя экранами, диаметр которых определен расчетным путем. *Результаты.* Разработаны добавочные резисторы с тремя экранами, доработана методика регулирования токов на входе и выходе добавочных резисторов путем изменения сопротивления экранных резисторов, разработана методика экспериментального определения погрешности компарирования преобразователей на 500 и 1000 В, что позволило существенно уменьшить частотную погрешность. *Выводы.* Таким образом, устройство для поверки ТЭКПН обеспечивает повышение точности определения и компенсации частотной погрешности добавочного резистора в широком частотном диапазоне, что приводит к повышению точности измерения напряжения с применением ТЭКПН в широком диапазоне измеряемых величин и частот.

**Ключевые слова:** добавочный резистор, термоэлектрический преобразователь напряжения, частотная погрешность, независимая поверка

**Для цитирования:** Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И. Независимая поверка термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 58–63. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-7

## INDEPENDENT VERIFICATION OF THERMOELECTRIC COMPARING VOLTAGE CONVERTERS

A.I. Nefed'ev<sup>1</sup>, D.I. Nefed'ev<sup>2</sup>

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

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

<sup>1</sup>nefediev@rambler.ru, <sup>2</sup>ndi200106@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* For metrological research, an urgent problem is a decentralized verification system based on the use of self-verified autonomous measuring instruments. Thus, an urgent task is the development of autonomously verified thermoelectric comparative voltage converters (TECVC). *Problem and solution.* Increasing the accuracy of voltage measurement using thermoelectric comparative voltage converters restrains the frequency error of the additional resistors. This is especially evident at high voltages. To solve this problem, thermoelectric comparative voltage converters for 500V and 1000V were developed, containing additional resistors with three screens, the diameter of which was determined by calculation. *Results.* Additional resistors with three screens have been developed, the method for regulating the currents at the input and output of additional resistors by changing the resistance of the screen resistors has been improved, a method has been developed for the experimental determination of the comparison error of converters for 500 and 1000V, which has significantly reduced the frequency error. *Conclusions.* Thus, the device for checking TECVC provides an increase in the accuracy of determining and compensating the frequency error of the additional resistor in a wide frequency range, which leads to an increase in the accuracy of voltage measurement using TECVC in a wide range of measured values and frequencies.

© Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Keywords:** series resistor, thermoelectric voltage converter, frequency error, independent verification

**For citation:** Nefed'ev A.I., Nefed'ev D.I. Independent verification of thermoelectric comparing voltage converters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2021;1:58–63. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-7

Для метрологических исследований как ранее, так и в настоящее время актуальной проблемой является децентрализованная система поверки на основе использования самоверяемых автономных средств измерений [1]. Считается, что централизованная система поверки не всегда является экономически целесообразной [2]. Таким образом, актуальной задачей является разработка автономно поверяемых термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения.

Для решения этой задачи были разработаны термоэлектрические компарирующие преобразователи напряжения на 500 и 1000 В и аттестованы по эталонным преобразователям НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в частотном диапазоне 10–100 000 Гц в качестве эталонных средств измерения 1-го разряда [3]. Несмотря на полученные результаты, проблема повышения точности автономно поверяемых термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения (ТЭКПН) на 500 и 1000 В в настоящее время все еще остается актуальной.

Наиболее простая конструкция ТЭКПН содержит резистор цилиндрической формы (рис. 1), коаксиально закрепленный в латунном корпусе и соединенный последовательно с термопреобразователем [3].

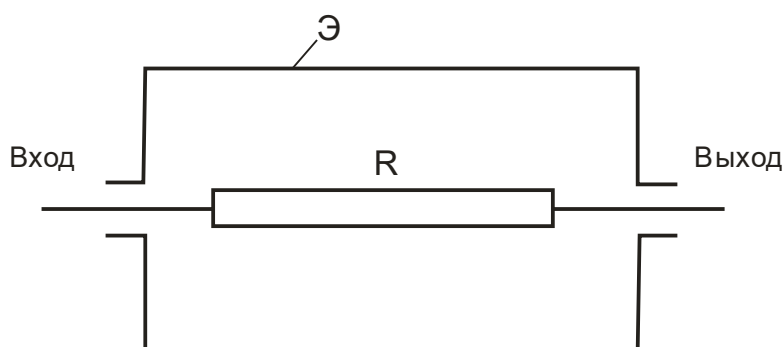


Рис. 1. Коаксиальный добавочный резистор на напряжение до 50 В

Для снижения частотной погрешности ТЭКПН применяются добавочные резисторы с двойными экранами (рис. 2), что снижает частотную погрешность в 16 раз.

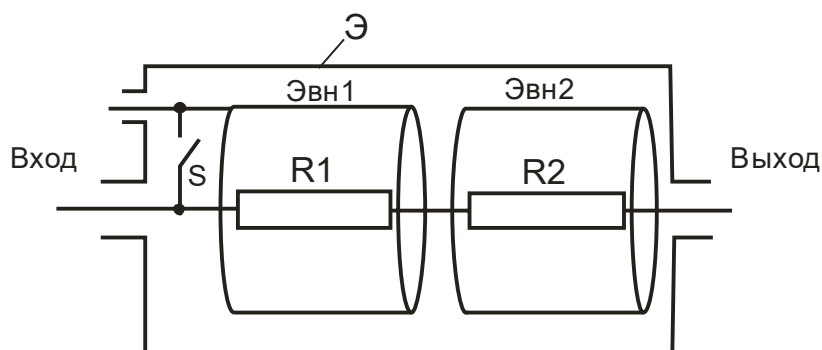


Рис. 2. Коаксиальный добавочный резистор с двойными экранами

Добавочный резистор с двойными экранами состоит из двух одинаковых последовательно соединенных частей, которые можно рассматривать как линии с распределенными параметрами, и предназначен для измерения переменного напряжения до 200 В.

Если сопротивление нагревателя ТЭКПН намного меньше сопротивления добавочного резистора, то реактивное сопротивление линий передачи:

$$|Z_{\text{вх}}| = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \cdot \text{th}\sqrt{Z \cdot Y}, \quad (1)$$

где  $Z = R + j\omega L$  – полное сопротивление добавочного резистора;  $Y = j\omega C$  – проводимость, обусловленная наличием шунтирующей емкости линии;  $R$  – активное сопротивление добавочного резистора;  $L$  – индуктивность добавочного резистора;  $C$  – шунтирующая емкость линии;  $\omega$  – круговая частота.

Модуль входного сопротивления  $|Z_{\text{вх}}|$ :

$$|Z_{\text{вх}}| = R \left( 1 + \frac{\omega^2 R^2 C^2}{180} + \frac{\omega^2 L^2}{2R^2} - \frac{\omega^2 CL}{6} \right). \quad (2)$$

Частотная погрешность преобразователя:

$$\gamma_f = \frac{\omega^2 R^2 C^2}{2} \left( \frac{L^2}{4RC^2} - \frac{L}{3R^2 C} + \frac{1}{90} \right). \quad (3)$$

Рассчитаем значение емкости и индуктивности через геометрические параметры коаксиальной линии:

$$C = \frac{0,24 \cdot 10^{-10} \epsilon l}{\lg\left(\frac{D}{d}\right)}, \quad (4)$$

$$L = 4,6 \mu 10^{-7} l \lg \frac{D}{d}, \quad (5)$$

где  $D$  – внутренний диаметр внешнего цилиндрического экрана;  $l$  и  $d$  – длина и диаметр добавочного резистора;  $\mu$  и  $\epsilon$  – магнитная и диэлектрическая проницаемость окружающей среды соответственно.

В экспериментальной конструкции ТЭКПН для уменьшения индуктивности добавочный резистор был сделан из нескольких резисторов типа С2-10, не имеющих спиральной нарезки и соединенных последовательно с помощью пайки.

В ТЭКПН на 500 и 1000 В имеются добавочные резисторы с двойными экранами. При этом диаметр экранов определен экспериментально путем сравнения показаний разработанных преобразователей и электростатического компаратора напряжения одновременного сравнения на 100 – 1000 В [4–7].

Поиски решения задачи повышения точности ТЭКПН на 500 и 1000 В привели к созданию добавочных резисторов с тремя экранами (рис. 3).

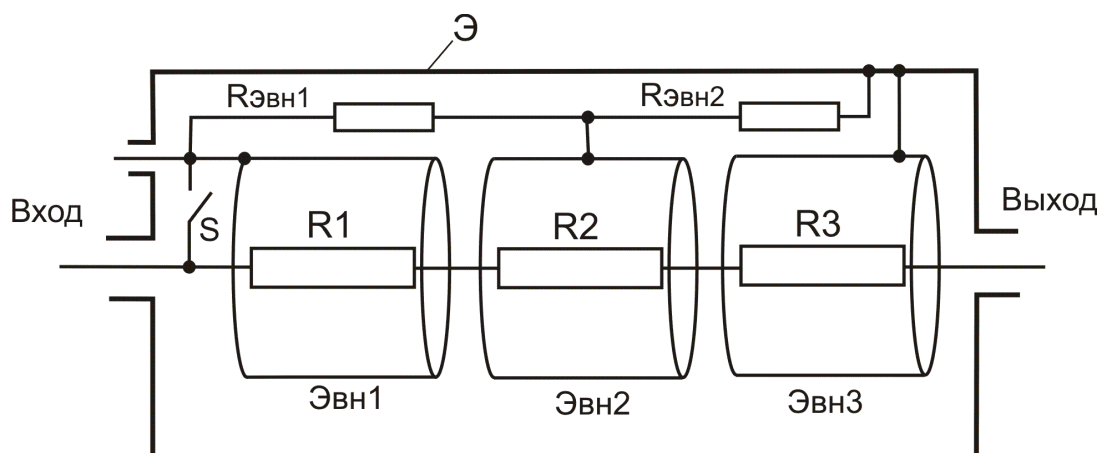


Рис. 3. Коаксиальный добавочный резистор на напряжение 500–1000 В

ТЭКПН с тремя экранами можно рассматривать как три последовательно соединенных участка коаксиальной линии:

$$Z'_{\text{вх}} = 3Z_{\text{вх}}, \quad (7)$$

где  $Z'_{\text{вх}}$  – полный импеданс преобразователя;  $Z_{\text{вх}}$  – импеданс участка, состоящего из одного резистора и экрана.

ТЭКПН с тремя экранами, по сравнению с преобразователем, выполненным с одним экраном, имеет в 81 раз меньшее расчетное значение частотной погрешности.

На рис. 4 схематически представлено устройство для независимой поверки ТЭКПН.

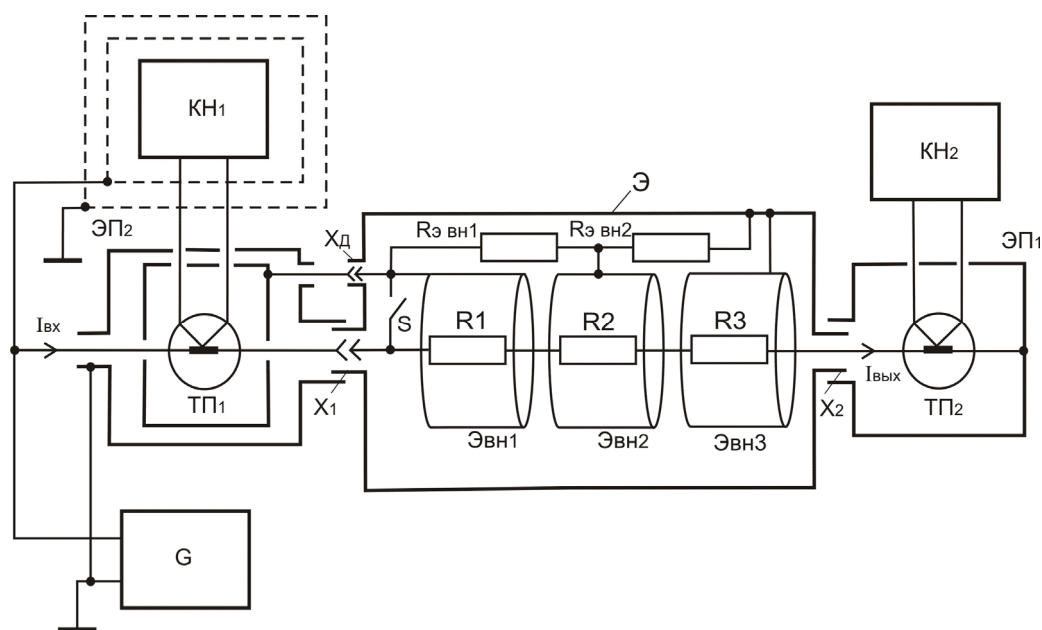


Рис. 4. Устройство для независимой поверки ТЭКПН

Устройство для независимой поверки содержит эталонный измеритель тока  $\mathcal{ЭП}_1$ , источник напряжения  $G$ , коаксиальный добавочный резистор (три последовательно включенные резисторы  $R_1 - R_3$  с экранами), эталонный измеритель тока  $\mathcal{ЭП}_2$ , компенсаторы напряжения  $\text{КН}_1$  и  $\text{КН}_2$  разъемы  $X_1$  и  $X_2$ .

Эталонный измеритель тока  $\mathcal{ЭП}_1$  и компенсатор напряжения  $\text{КН}_1$  выполнены с двойным экранированием. При этом наружные экраны заземлены, а внутренние экраны подключены к высокому потенциалу источника напряжения  $G$  для предотвращения утечек тока с термопреобразователя  $\text{ТП}_1$ . Введение выключателя  $S$  в коаксиальный добавочный резистор предотвращает утечку тока со входа добавочного резистора через экраны  $\mathcal{Э}_1$ ,  $\mathcal{Э}_2$  и  $\mathcal{Э}_3$  и компенсирует погрешность резисторов  $R_1 - R_3$  от утечки тока, обусловленной емкостью между резисторами  $R_1 - R_3$  и экранами  $\mathcal{Э}_1$ ,  $\mathcal{Э}_2$  и  $\mathcal{Э}_3$ .

Термопара термопреобразователя  $\text{ТП}_2$  эталонного измерителя тока  $\mathcal{ЭП}_2$  подключена к компенсатору напряжения  $\text{КН}_2$ , в качестве которого использован потенциометр постоянного тока Р363/1. Неравенство тока ( $I_{\text{вх}}$ ) на входе добавочного резистора и на его выходе ( $I_{\text{вых}}$ ) при увеличении частоты из-за неполной компенсации индуктивности резисторов  $R_1 - R_3$  и емкости экранов  $\mathcal{Э}_1 - \mathcal{Э}_3$  устраняется путем изменения сопротивления резисторов  $R_{\mathcal{ЭВН}1}$  и  $R_{\mathcal{ЭВН}2}$ .

В ТЭКПН с тремя экранами использованы добавочные резисторы и термопреобразователи типа ТВБ-3. Выполнение условия равенства входного и выходного токов на переменном напряжении на низкой и высокой частоте свидетельствует о полном устранении или минимизации частотной погрешности.

Погрешность ТЭКПН определялась экспериментально по методике [8] с применением в качестве эталонного средства измерений электростатического компаратора напряжения с погрешностью компарирования не более 0,001 % [4–7].

Погрешности ТЭКПН с тремя экранами на разных частотах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Погрешность ТЭКПН с тремя экранами

Номинальное напряжение, В	Погрешность $\delta \cdot 10^{-5}$				
	10 Гц	$10^2$ Гц	$10^3$ Гц	$10^4$ Гц	$10^5$ Гц
500	-3	+2	-1	+3	-2
1000	-3	-4	-2	-3	-5

Таким образом, устройство для поверки ТЭКПН обеспечивает повышение точности определения и компенсации частотной погрешности добавочного резистора в широком частотном диапазоне, что приводит к повышению точности измерения напряжения с применением ТЭКПН в широком диапазоне измеряемых величин и частот.

Для повышения точности компарирования ТЭКПН на 500 и 1000 В были разработаны добавочные резисторы с тремя экранами, диаметр которых определен расчетным путем, доработана методика регулирования токов на входе и выходе добавочных резисторов путем изменения сопротивления экранных резисторов, приведены результаты экспериментального определения погрешности компарирования преобразователей на 500 и 1000 В с применением в качестве эталонного средства измерений электростатического компаратора напряжения.

#### Список литературы

1. Павлов И. В. Современные требования к обеспечению единства измерений // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 7. С. 7–10.
2. Конюхов А. Г. Метрологическое обеспечение в приборостроении. Аспекты управления. М. : Изд-во стандартов, 1990. С. 40.
3. АС СССР №1331274, МПК G01R 35/00. Устройство для поверки термоэлектрических компарирующих преобразователей напряжения / Нефедьев И. А. Опубл. 07.04.1991, Бюл. № 13.
4. Патент РФ № 2076328, МПК G 01 R 17/08. Электростатический компаратор напряжения / Нефедьев А. И. Опубл. 27.03.1997, Бюл. № 9.
5. Nefed'ev A. I., Nefed'eva E. E. Accurate AC/DC voltage measurements using electrostatic comparator // Journal of Electrostatics. 2016. Vol. 82. С. 17–21.
6. Нефедьев А. И. Электростатический компаратор напряжения // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 51–55.
7. Nefed'ev A. I., Kravchenko S. New principle for exact DC/AC electrostatic comparators // Measurement Techniques. 2000. Vol. 43, № 4. P. 368–373.
8. ГОСТ 13384-93. Преобразователи измерительные для термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. Минск : Изд-во стандартов, 1996.

#### References

1. Pavlov I.V. Modern requirements for ensuring the uniformity of measurements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2011;54(7):7–10. (In Russ.)
2. Konyukhov A.G. *Metrologicheskoe obespechenie v priborostroenii. Aspekty upravleniya = Metrological support in instrument engineering. Management aspects*. Moscow: Izd-vo standartov, 1990:40. (In Russ.)
3. AS SSSR №1331274, MPK G01R 35/00. *Ustroystvo dlya poverki termoelektricheskikh kompariruyushchikh preobrazovateley napryazheniya = Device for checking thermoelectric comparing voltage converters*. Nefed'ev I. A. Publ. 07.04.1991, bull. № 13. (In Russ.)
4. Patent № 2076328 Russian Federation, MPK G 01 R 17/08. *Elektrostaticheskii komparator napryazheniya = Electrostatic voltage comparator*. Nefed'ev A. I. Publ. 27.03.1997, bull. no. 9. (In Russ.)
5. Nefed'ev A.I., Nefed'eva E.E. Accurate AC/DC voltage measurements using electrostatic comparator. *Journal of Electrostatics*. 2016;82:17–21.
6. Nefed'ev A.I. Electrostatic voltage comparator. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2009;6:51–55. (In Russ.)
7. Nefed'ev A.I., Kravchenko S. New principle for exact DC/AC electrostatic comparators. *Measurement Techniques*. 2000;43(4):368–373.
8. GOST 13384-93. *Preobrazovateli izmeritel'nye dlya termoelektricheskikh preobrazovateley i termopreobrazovateley soprotivleniya. Obshchie tekhnicheskije trebovaniya i metody ispytaniy = Measuring converters for thermoelectric converters and thermal resistance converters. General technical requirements and test methods*. Minsk: Izd-vo standartov, 1996. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Алексей Иванович Нефедьев**

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

**Aleksey I. Nefed'ev**

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

**Дмитрий Иванович Нефедьев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ndi200106@yandex.ru

**Dmitriy I. Nefed'ev**

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

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 684.4.05

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-8

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ

Т. О. Зинченко<sup>1</sup>, Е. А. Печерская<sup>2</sup>, В. И. Кондрашин<sup>3</sup>,  
В. В. Антипенко<sup>4</sup>, О. А. Мельников<sup>5</sup>, О. В. Карпанин<sup>6</sup><sup>1,2,4,5,6</sup> Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия<sup>3</sup> ООО «Парадигма», г. Пенза, Россия<sup>1</sup> scar0243@gmail.com, <sup>2</sup> pea1@list.ru, <sup>3</sup> vlad\_kondrashin@mail.ru,<sup>4</sup> v.antipenko7@yandex.ru, <sup>5</sup> oleg-068@mail.ru, <sup>6</sup> karpanino@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Развитие науки и техники привело к появлению огромного количества оптоэлектронных устройств. Одним из наиболее часто используемых слоев в структуре приборов является прозрачный электрод. Для их производства используются прозрачные проводящие оксиды, на процесс получения которых влияет множество разнородных факторов. Цель исследования – выявление контролируемых факторов, оказывающих влияние на электрофизические свойства прозрачных проводящих оксидов. *Материалы и методы.* Для синтеза прозрачных проводящих оксидов использован метод спрей-пиролиза. Соответственно факторы, оказывающие влияние на свойства и описанные в данной работе, напрямую касаются технологии пиролиза аэрозолей. В качестве материала применен оксид олова и оксид олова, легированный сурьмой, в качестве подложки использовано обычное оконное стекло. *Результаты.* Исследовано влияние примеси, температуры отжига, толщины покрытия, давления в распылителе, подвижности носителей заряда и ширины запрещенной зоны на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий. *Вывод.* Выявлена оптимальная температура отжига. Установлены причины влияния указанных выше параметров на электрофизические свойства прозрачных проводящих оксидов. Установлены зоны, в которых влияние концентрации примеси положительно или отрицательно.

**Ключевые слова:** прозрачный электрод, прозрачный проводящий оксид, проводимость, поверхностное сопротивление, примесь, отжиг, толщина, давление в распылителе, подвижность носителей заряда

**Благодарности и финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90044.

**Для цитирования:** Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И., Антипенко В. В., Мельников О. А., Карпанин О. В. Анализ факторов, влияющих на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 64–72. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-8

## ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF TRANSPARENT CONDUCTIVE COATINGS

Т. О. Zinchenko<sup>1</sup>, Е. А. Pecherskaya<sup>2</sup>, V. I. Kondrashin<sup>3</sup>,  
V. V. Antipenko<sup>4</sup>, O. A. Mel'nikov<sup>5</sup>, O. V. Karpanin<sup>6</sup><sup>1,2,4,5,6</sup> Penza State University, Penza, Russia<sup>3</sup> LLC "Paradigm", Penza, Russia<sup>1</sup> scar0243@gmail.com, <sup>2</sup> pea1@list.ru, <sup>3</sup> vlad\_kondrashin@mail.ru,<sup>4</sup> v.antipenko7@yandex.ru, <sup>5</sup> oleg-068@mail.ru, <sup>6</sup> karpanino@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The development of science and technology has led to the emergence of a huge number of optoelectronic devices. One of the most commonly used layers in the structure of devices is a transparent electrode. For their production, transparent conductive oxides are used, the production process of which is influenced by many differ-

© Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И., Антипенко В. В., Мельников О. А., Карпанин О. В., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



ent factors. The aim of the study is to identify controllable factors that affect the electrophysical properties of transparent conducting oxides. *Materials and methods.* For the synthesis of transparent conducting oxides, the spray pyrolysis method was used. Accordingly, the factors influencing the properties and described in this work directly relate to the technology of aerosol pyrolysis. Tin oxide and antimony-doped tin oxide were used as the material; ordinary window glass was used as the substrate. *Results.* The effect of impurity, annealing temperature, coating thickness, pressure in the sprayer, charge carrier mobility, and band gap on the electrophysical properties of transparent conductive coatings has been investigated. *Conclusion.* The optimal annealing temperature was found. The reasons for the influence of the above parameters on the electrophysical properties of transparent conducting oxides are established. The zones were established in which the influence of the impurity concentration is positive or negative.

**Keywords:** transparent electrode, transparent conducting oxide, conductivity, surface resistance, impurity, annealing, thickness, pressure in the atomizer, mobility of charge carriers

**Acknowledgments and funding:** The study was carried out with the financial support of RFFI in the framework of scientific project No. 20-38-90044.

**For citation:** Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I., Antipenko V.V., Mel'nikov O.A., Karpanin O.V. Analysis of factors affecting the electrophysical properties of transparent conductive coatings. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:64–72. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-8

### *Введение*

Спрос на прозрачные проводящие оксиды (ППО) в последние годы резко вырос благодаря тому, что они являются ключевыми компонентами жидкокристаллических дисплеев, сенсорных экранов и в качестве электродов фотоэлектрических элементов [1]. Также их применяют в просветляющих покрытиях [2], в волноводах плазменных устройств [3], в органических светоизлучающих устройствах [4] и биоаналитических устройствах [5]. Современный рынок с самой высокой долларовой стоимостью для ППО – это прозрачные электроды в плоских дисплеях (FPDs), рынок оценивается в 135 млрд долл. в 2020 г. [6]. Действующее законодательство Европы и США требует, чтобы все новые здания были оснащены системой контроля солнечной энергии, оконных покрытий, благодаря которым такие продукты, как прозрачные проводящие покрытия на стекле, способствовали созданию многомиллиардного рынка низкоэмиссионных стеклянных покрытий [7].

### *Анализ влияния факторов на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий*

В результате работы получены экспериментальные образцы диоксида олова и диоксида олова, легированного сурьмой.

Хорошо известно, что работа выхода и химический состав на поверхности многих ППО сильно зависят от метода очистки, что указывает на то, что они могут быть нестабильны к окислению, но стоит отметить, что выбранный материал (оксид олова-сурьмы) не имеет такой зависимости.

После проведения исследования поверхностного сопротивления этих образцов выявлена тенденция, что покрытия чистого диоксида олова, значительно выше, нежели легированного сурьмой. Особенности можно объяснить следующим образом: нелегированные тонкие пленки  $\text{SnO}_2$  имеют собственный точечный дефект, который в основном возникает из-за свободных электронов-носителей, генерируемых избыточным Sn в качестве примеси (самолегирование), и ведет себя как *n*-тип материал. Но введенная примесь в структуру покрытия позволяет значительно увеличить число свободных носителей заряда. Поэтому проводимость значительно возрастает, а поверхностное сопротивление снижается.

Полученная зависимость поверхностного сопротивления от концентрации примеси представлена на рис. 1.

На рис. 1 наблюдаются три зоны: 1 – зона резкого падения поверхностного сопротивления; 2 – зона плавного падения поверхностного сопротивления; 3 – зона увеличения поверхностного сопротивления. Рассмотрим каждую зону подробнее.

В первой области происходит резкий рост проводимости. Это связано с тем, что чистый диоксид олова обладает крайне низкой проводимостью и введение примеси резко снижает сопротивление за счет увеличения количества свободных носителей заряда.

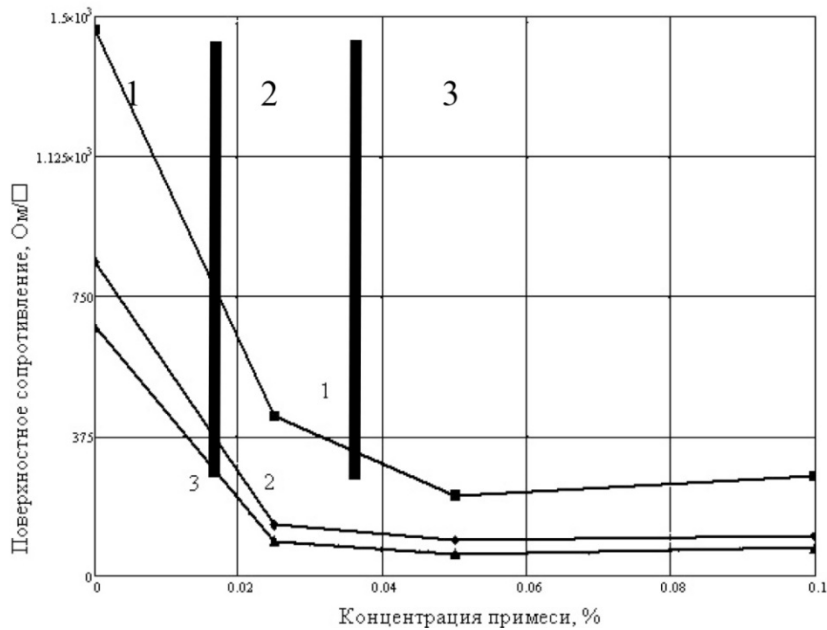


Рис. 1. Зависимость поверхностного сопротивления от концентрации примеси

Во второй области проводимость определяется не только концентрацией носителей заряда, но и подвижностью. В этой области концентрация носителей заряда увеличивается, а подвижность снижается из-за уменьшения размера зерна, что и показано на рис. 2.

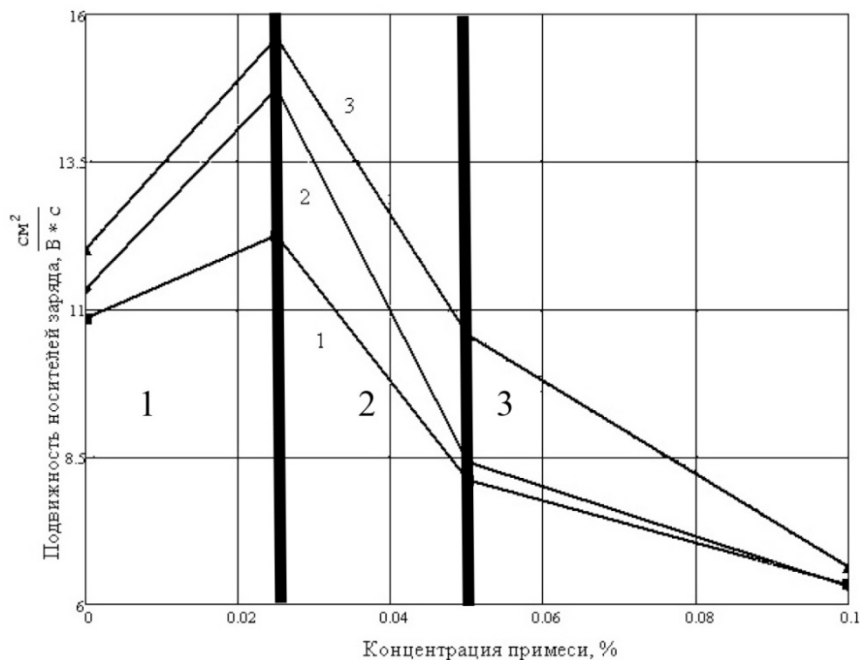


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примеси

На высоколегированном участке 3 поверхностное сопротивление пленок начинает увеличиваться. Увеличение концентрации легирующей примеси в пленке ППО также увеличивает плотность дефектов; при этом проводимость поддерживают донорные характеристики легирующей примеси, но они постепенно перевешиваются эффектом рассеяния электронов из-за повышенного количества дефектов. Длина свободного пробега носителей заряда и, следовательно, время релаксации свободных носителей сокращаются, что увеличивает сопротивление пленки. Кроме того, высокая концентрация носителей увеличивает вероятность столкновений носителей заряда [8].

Свойства легирующих материалов могут сочетаться, чтобы дополнять друг друга, и при этом минимум зоны проводимости снижается (т.е. увеличивается сродство к электрону), чтобы обеспечить выравнивание полосы и омический контакт с другими материалами, в то время как уровень Ферми становится выше минимума, что повышает функциональность ППО.

Энергия Ферми – максимальная энергия электронов при температуре абсолютного нуля. Энергия Ферми рассчитывается по формуле

$$E_f = \left( \frac{h^2}{m^*} \right) \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $m^*$  – эффективная масса электрона;  $n$  – концентрация носителей заряда. Полученные результаты варьируются в диапазоне от  $8,6 \cdot 10^{-20}$  до  $1 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Время синтеза покрытия оказывает влияние на сопротивление тонких пленок. Поверхностное сопротивление тонких пленок ППО как функция толщины покрытия показано на рис. 3. Соотношение между толщиной пленки и временем нанесения покрытия практически линейно.

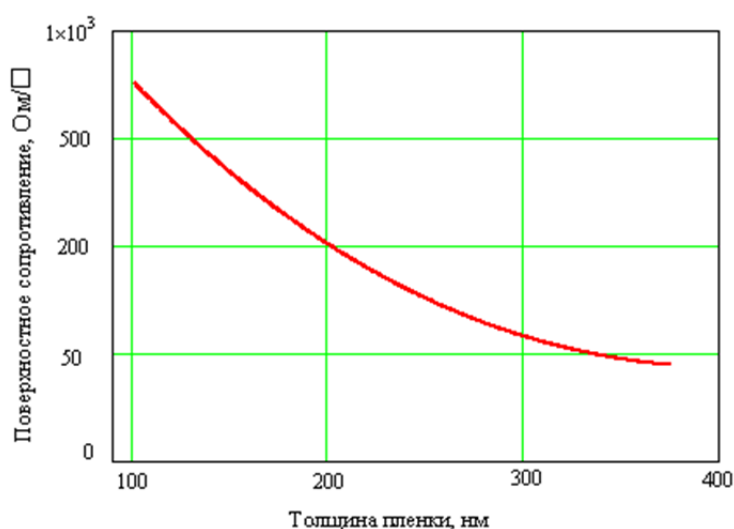


Рис. 3. Зависимость поверхностного сопротивления от толщины покрытия

Размер зерна и степень кристалличности повышаются с ростом слоя покрытия. Это увеличивает показатели длины свободного пробега носителей заряда, уменьшает рассеяние электронов, а следовательно, уменьшает поверхностное сопротивление.

Однако уменьшение сопротивления имеет место до определенного значения. Далее происходит активное проявление дефектов, возможность образования микротрещин и диффузии атомов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  из подложки после многократной сушки [9].

На толщину оказывают влияние режимы нанесения ППО. При увеличении входного давления воздуха в распылителе  $p$  наблюдается уменьшение толщины пленки (рис. 4). Данный эффект связан с повышением скорости потока аэрозоля и со снижением размера его капель. Заметное увеличение толщины происходит, когда давление становится менее 1,5 атм. В области от 1,5 до 2,3 атм. толщина пленки изменяется мало. Исходя из зависимости, представленной на рисунке, можно отметить, что в качестве оптимального входного давления в распылителе для осаждения пленок диоксида олова можно выбрать значение  $p = 2,0$  атм. [10].

Расстояние между соплом распылителя и подложкой  $H$  определяет, прежде всего, площадь покрытия пленок и влияет на их толщину. При сокращении этого расстояния область покрытия уменьшается.

В каждой экспериментальной установке для проведения спрей-пиролиза имеются верхний и нижний пределы расстояния до подложки, которые зависят от способа распыления. При электростатическом распылении нижний предел задается размером подложки, а верхний предел зависит от максимального напряжения, определяемого характеристиками высоковольтного источника питания и пробивным напряжением. Последнее может привести к нестабильному распылению жидкости или к тому, что жидкость совсем не будет распыляться. Для того

чтобы предотвратить это, все элементы экспериментальной установки должны быть надежно электрически изолированы.

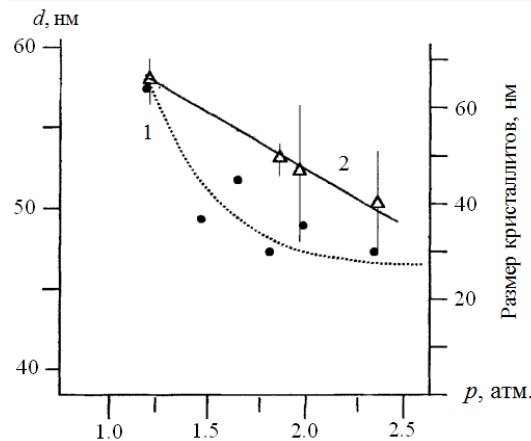


Рис. 4. Зависимости толщины пленки SnO<sub>2</sub> и размера кристаллитов от входного давления воздуха в распылителе ( $T_s = 400$  °C):  
1 – зависимость толщины; 2 – зависимость размера кристаллитов

При напряжениях свыше 40 кВ распыление становится хуже или совсем прекращается. Это ограничивает максимальное расстояние между распылителем и подложкой в ~20 см, так как при больших расстояниях напряженность электрического поля не будет достаточно высокой, чтобы распылять раствор должным образом.

При пневматическом распылении существуют другие виды ограничений. В этом случае минимальное расстояние между распылителем и подложкой ограничивается не размером подложки, а охлаждающим эффектом воздушного потока. На малых расстояниях происходит сильное охлаждение подложки. Следовательно, от нагревателя требуется больше тепла, так как плотность потока аэрозоля увеличивается с уменьшением расстояния, и при определенном расстоянии невозможно достичь оптимальной температуры подложки.

Верхний предел определяется расстоянием, при котором нарушается распыление. Как правило, максимальное расстояние зависит от конструкции распылителя и входного давления воздуха [11].

Толщина осаждаемой пленки уменьшается, если расстояние между соплом распылителя и подложкой увеличивается, так как в этом случае повышается эффект расширения потока аэрозоля. Зависимость, представленная на рис. 5, не подчиняется закону  $d \sim 1/H^2$ , характерному для физических методов напыления, и позволяет определить, что в качестве оптимального расстояния для осаждения пленок диоксида олова можно выбрать значение ~20 см [10].

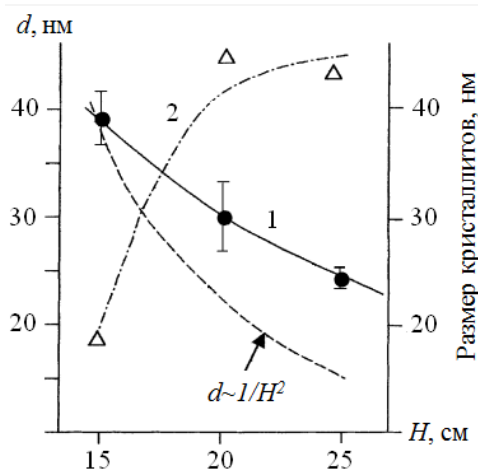


Рис. 5. Зависимости толщины пленки SnO<sub>2</sub> и размера кристаллитов от расстояния между соплом распылителя и подложкой ( $T_s = 400$  °C):  
1 – зависимость толщины; 2 – зависимость размера кристаллитов

Максимальное значение скорости распыления зависит главным образом от способа перевода жидкости в аэрозоль, а также от таких свойств распыляемой жидкости, как поверхностное натяжение, вязкость и т.д. Для повышения скорости в раствор прекурсора можно добавлять специальные вещества (ацетилацетон, различные поверхностно-активные вещества), снижающие эти свойства [12].

Скорость распыления влияет на кристалличность пленок, толщину и сопротивление. Уменьшение скорости способствует увеличению размера кристаллитов и формированию высокой степени кристалличности, потому что в этом случае требуется дольше по времени проводить процесс осаждения, чем при более высокой скорости. Повышение кристалличности приводит к увеличению проводимости пленок.

Поверхностное сопротивление образцов уменьшалось, а затем увеличивалось с увеличением температуры отжига. Поверхностное сопротивление при температуре отжига 450 °С самое низкое по сравнению с другими. При более высокой температуре отжига большее количество сурьмы имеет достаточно энергии, чтобы проникнуть в места замещения олова, увеличивая образование свободных носителей заряда. Одновременно более высокая температура отжига увеличивает кристалличность и размер зерен в тонкой пленке, которые улучшают показатели длины свободного пробега носителей заряда и уменьшают рассеяния электронов и, как следствие, происходит снижение поверхностного сопротивления тонких пленок. Когда температура поднялась до 500 °С, поверхностное сопротивление начало активно расти, что может быть связано с тем, что ионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  в стекле диффундируют в пленку ППО и рассеяние носителей становится сильнее [13].

Сопротивление покрытия  $\text{SnO}_2$  намного выше, чем у легированного 15 % АТО, также отожженного при 550 °С. Также обнаружено, что дырочные носители были образованы  $\text{Sb}_3^+$  вместо  $\text{Sn}_4^+$ . Концентрация дырок пленки  $\text{SnO}_2$  уменьшилась при 550 °С, поскольку фазы  $\text{Sn}_2\text{O}_3$  окислялись, что также увеличивало подвижность. Концентрация дырок в пленках 15 % АТО сначала увеличилась с повышением температуры отжига, а пик концентрации дырок был получен после отжига при 550 °С за 1 ч. При дальнейшем увеличении температуры отжига значение концентрации дырок начало уменьшаться из-за исчезновения акцептора  $\text{Sn}_3^+$ . Пленки 15 % АТО, отожженные при 550 °С за 1 ч, обладают низким сопротивлением (0,83 Ом·см).

Пример зависимости сопротивления  $R$  пленки диоксида олова от температуры подложки представлен на рис. 6. Как видно, сопротивление сначала уменьшается с ростом  $T_s$ , так как размер кристаллитов и, соответственно, кристалличность пленки увеличиваются. После достижения определенного минимального значения сопротивление начинает возрастать в результате уменьшения концентрации носителей заряда [14]. Для зависимости, представленной на рисунке, это значение соответствует  $T_s \sim 500$  °С [10].

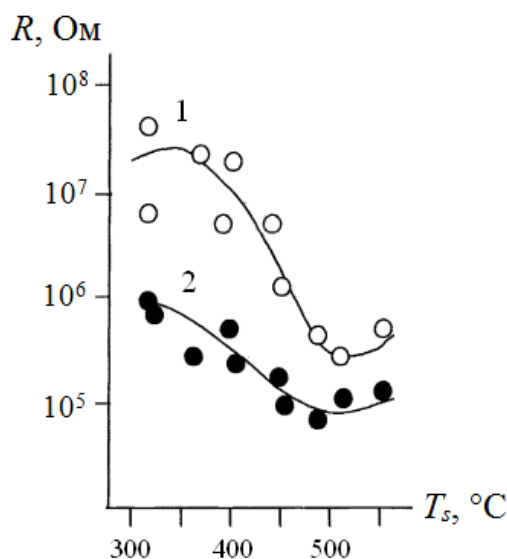


Рис. 6. Влияние температуры подложки на сопротивление пленки  $\text{SnO}_2$  ( $d \sim 25\text{--}35$  нм):  
1 – в чистом воздухе; 2 – в воздухе при наличии газовой примеси (2 %  $\text{H}_2$ )

Увеличение сопротивления вызвано ликвидацией кислородных вакансий (более полным окислением) [15]. Некоторые исследования также показывают, что изменение сопротивления можно объяснить изменением подвижности носителей заряда [16, 17].

### Заключение

На поверхностное сопротивление оказывают различное влияние параметры технологического процесса, а также параметры раствора и некоторые показатели самой пленки. С ростом концентрации примеси до определенного значения проводимость растет, но затем рассеяние носителей преобладает и начинается рост сопротивления. С возрастанием подвижности носителей заряда проводимость также увеличивается. С увеличением толщины пленки ситуация такая же, как и с концентрацией, проводимость растет до определенного значения, затем проявляются дефекты. Температура отжига, равная 450 °С, оптимальна для качественных ППО. Скорость распыления влияет на кристалличность пленок, толщину и сопротивление. Уменьшение скорости способствует увеличению размера кристаллитов и формированию высокой степени кристалличности. Оптимальное расстояние между распылителем и подложкой для осаждения пленок диоксида олова ~20 см. Также проводимость зависит от температуры подложки. Сопротивление сначала уменьшается с ростом  $T_s$ , так как размер кристаллитов и, соответственно, кристалличность пленки увеличиваются. После достижения определенного минимального значения сопротивление начинает возрастать в результате уменьшения концентрации носителей заряда.

### Список литературы

1. Ginley D. S., Bright C. Transparent Conducting Oxides // MRS Bull. 2000. Vol. 25. P. 15–18.
2. Cai J., Qi L. Recent advances in antireflective surfaces based on nanostructure arrays // Mater. Horiz. 2015. Vol. 2. P. 37–53.
3. Lin Y., Zhang X., Bai S., Hu A. Photo-reduction of metallic ions doped in patterned polymer films for the fabrication of plasmonic photonic crystals // J. Mater. Chem. C. 2015. Vol. 3. P. 6046–6052.
4. Wong F. L., Fung M. K., Tong S. W. [et al.]. Flexible organic light-emitting device based on magnetron sputtered indium-tin-oxide on plastic substrate // Thin Solid Films. 2004. Vol. 466. P. 225–230.
5. Fair R. B. Digital microfluidics: is a true lab-on-a-chip possible? // Microfluid. Nanofluid. 2007. Vol. 3. P. 245–281.
6. Flat Panel Display Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2014–2020: FMI. URL: <http://www.digitaljournal.com/pr/2526206#ixzz6nxN7rz82>
7. Letcher T. M., Scott J. L. Materials for a Sustainable Future. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2012. 828 p. ISBN (Print) 9781849734073.
8. Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A. [et al.]. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 225. P. 012255.
9. Dixon S. C., Scanlon D. O., Carmalt C. J., Parkin I. P. n-Type doped transparent conducting binary oxides: an overview Sebastian C. J. // Mater. Chem. C. 2016. Vol. 4. P. 6946. doi: 10.1039/c6tc01881e
10. Korotchenkov G., Brinzari V., Schwank J. [et al.]. Peculiarities of SnO<sub>2</sub> thin film deposition by spray pyrolysis for gas sensor application // Sensors and Actuators B. 2001. Vol. 77. P. 244–252.
11. Perednis D. Thin film deposition by spray pyrolysis and the application in solid oxide fuel cells : dissertation. Zurich : Swiss Federal Institute of Technology, 2003.
12. Anca D., Pernu D., Isac L., Enesca A. Solar energy materials obtained by spray pyrolysis deposition. URL: <http://www.gobookee.net/thin-film-deposition-by-spray-pyrolysis>
13. Dang H. P., Luc Q. H., Le T., Le V. H. The Optimum Fabrication Condition of p-Type Antimony Tin Oxide Thin Films Prepared by DC Magnetron Sputtering // Journal of Nanomaterials. 2016. P. 1–11. doi: 10.1155/2016/7825456
14. Zinchenko T., Pecherskaya E., Artamonov D. The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis // AIMS Materials Science. 2019. Vol. 6 (2). P. 276–287. doi: 10.3934/mat.2019.2.276
15. Sanon G., Rup R., Mansingh A. Growth and characterization of tin oxide films by chemical vapor deposition // Thin Solid Films. 1990. Vol. 190. P. 287–301.
16. Зинченко Т. О., Печерская Е. А. Анализ материалов, используемых для производства прозрачных проводящих покрытий // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. С. 256–258.

17. Печерская Р. М., Печерская Е. А., Метальников А. М. [и др.] Синтез и свойства нанокристаллических пленок диоксида олова, полученных методом пиролиза аэрозолей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2012. № 4. С. 237–241.

### References

- Ginley D.S., Bright C. Transparent Conducting Oxides. *MRS Bull.* 2000;25:15–18.
- Cai J., Qi L. Recent advances in antireflective surfaces based on nanostructure arrays. *Mater. Horiz.* 2015;2:37–53.
- Lin Y., Zhang X., Bai S., Hu A. Photo-reduction of metallic ions doped in patterned polymer films for the fabrication of plasmonic photonic crystals. *J. Mater. Chem. C.* 2015;3:6046–6052.
- Wong F.L., Fung M.K., Tong S.W. [et al.]. Flexible organic light-emitting device based on magnetron sputtered indium-tin-oxide on plastic substrate. *Thin Solid Films.* 2004;466:225–230.
- Fair R.B. Digital microfluidics: is a true lab-on-a-chip possible? *Microfluid. Nanofluid.* 2007;3:245–281.
- Flat Panel Display Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2014–2020: FMI.* Available at: <http://www.digitaljournal.com/pr/2526206#ixzz6nxN7rz82>
- Letcher T.M., Scott J.L. *Materials for a Sustainable Future.* Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2012:828. ISBN (Print) 9781849734073.
- Zinchenko T.O., Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A. [et al.]. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2017;225:012255.
- Dixon S.C., Scanlon D.O., Carmalt C.J., Parkin I.P. n-Type doped transparent conducting binary oxides: an overview Sebastian C. J. *Mater. Chem. C.* 2016;4:6946. doi: 10.1039/c6tc01881e
- Korotchenkov G., Brinzari V., Schwank J. [et al.]. Peculiarities of SnO<sub>2</sub> thin film deposition by spray pyrolysis for gas sensor application. *Sensors and Actuators B.* 2001;77:244–252.
- Perednis D. *Thin film deposition by spray pyrolysis and the application in solid oxide fuel cells: dissertation.* Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2003.
- Anca D., Perniu D., Isac L., Enesca A. *Solar energy materials obtained by spray pyrolysis deposition.* Available at: <http://www.gobookee.net/thin-film-deposition-by-spray-pyrolysis>
- Dang H.P., Luc Q.H., Le T., Le V.H. The Optimum Fabrication Condition of p-Type Antimony Tin Oxide Thin Films Prepared by DC Magnetron Sputtering. *Journal of Nanomaterials.* 2016:1–11. doi: 10.1155/2016/7825456
- Zinchenko T., Pecherskaya E., Artamonov D. The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis. *AIMS Materials Science.* 2019;6(2):276–287. doi: 10.3934/matricsci.2019.2.276
- Sanon G., Rup R., Mansingh A. Growth and characterization of tin oxide films by chemical vapor deposition. *Thin Solid Films.* 1990;190:287–301.
- Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A. Analysis of materials used for the production of transparent conductive coatings. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy : sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. = Information technologies in science and education. Problems and prospects: collection of scientific articles All-Russian. inter-university. scientific and practical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2018:256–258. (In Russ.)
- Pecherskaya R.M., Pecherskaya E.A., Metal'nikov A.M. [et al.]. Synthesis and properties of nanocrystalline tin dioxide films obtained by aerosol pyrolysis. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2012;4:237–241. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Тимур Олегович Зинченко

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

#### Timur O. Zinchenko

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

#### 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 sub-department of information  
and measuring equipment and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Владислав Игоревич Кондрашин**

генеральный директор,  
ООО «Парадигма»  
(Россия, г. Пенза, ул. Ворошилова, 2, 57)  
E-mail: vlad\_kondrashin@mail.ru

**Vladislav I. Kondrashin**

General director,  
LLC "Paradigma"  
(57, 2 Voroshilova street, Penza, Russia)

**Владимир Викторович Антипенко**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: v.antipenko7@yandex.ru

**Vladimir V. Antipenko**

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

**Олег Андреевич Мельников**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: oleg-068@mail.ru

**Oleg A. Mel'nikov**

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

**Олег Валентинович Карпанин**

старший преподаватель,  
кафедра нано- и микроэлектроники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: karpanino@mail.ru

**Oleg V. Karpanin**

Senior lecturer,  
sub-department of nano-and microelectronics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)



# ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 614.21

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-9

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СЕРДЦА

М. Н. Крамм<sup>1</sup>, О. Е. Безбородова<sup>2</sup>, О. Н. Бодин<sup>3</sup>, А. В. Светлов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет, г. Москва, Россия

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

<sup>1</sup> KrammMN@mail.ru, <sup>2</sup> ot@pnzgu.ru, <sup>3</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>4</sup> rtech@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Проблема борьбы с сердечно-сосудистыми заболеваниями среди населения приобретает общегосударственное значение в силу роста заболеваемости, высокого уровня инвалидности и смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, пожизненного, дорогого медикаментозного лечения и диктует необходимость уделять все большее внимание ранней профилактике этих заболеваний. Одним из направлений профилактики и диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, которое стало возможным благодаря техническому прогрессу, является математическое моделирование электрической активности сердца. Концепция цифрового двойника сердца основана на математическом моделировании электрической активности сердца со всеми параметрами и функциональностью с использованием цифровых технологий. Целью работы является разработка цифрового двойника сердца на основе эквивалентных электрических генераторов сердца поверхностного и дипольного типов с визуализацией в течение кардиоцикла состояния его электрической активности на поверхности эпикарда для диагностики нарушений процессов проводимости и вектора дипольного момента для диагностики ишемии миокарда. Указанное сочетание функциональных возможностей является отличительной особенностью разработанного цифрового двойника сердца на основе эквивалентных электрических генераторов сердца поверхностного и дипольного типов. При этом текстурирование цифрового двойника сердца позволяет визуализировать выявленное в результате диагностики повреждение миокарда. *Материалы и методы.* В исследовании используются методы математического моделирования, интеллектуальные методы обработки и компьютерной визуализации результатов моделирования. *Результаты и выводы.* Предложенное авторами представление цифрового двойника сердца позволяет визуализировать электрическую активность сердца на поверхности эпикарда, что приближает (при наличии диагностической информации) возможности функциональной диагностики к возможностям компьютерной томографии.

**Ключевые слова:** сердце, цифровой двойник, эквивалентный электрический генератор сердца поверхностного и дипольного типов

**Для цитирования:** Крамм М. Н., Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Светлов А. В. Цифровой двойник сердца // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 73–84. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-9

## DIGITAL HEART DOUBLE

M.N. Kramm<sup>1</sup>, O.E. Bezborodova<sup>2</sup>, O.N. Bodin<sup>3</sup>, A.V. Svetlov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> National Research University, Moscow, Russia

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

<sup>1</sup> KrammMN@mail.ru, <sup>2</sup> ot@pnzgu.ru, <sup>3</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>4</sup> rtech@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* The problem of combating cardiovascular diseases among the population is acquiring national importance due to the increase in morbidity, high level of disability and mortality from cardiovascular diseases, lifelong, expensive drug treatment, and dictates the need to pay more and more attention to early prevention of these diseases. One of the areas of prevention and diagnosis of cardiovascular diseases, which has become possible due to technological progress, is the mathematical modeling of the electrical activity of the heart. The concept of a digital twin of the heart is based on mathematical modeling of the electrical activity of the heart with all parameters and functionality

using digital technologies. The aim of the work is to develop a digital twin of the heart based on equivalent electrical generators of the heart of the surface and dipole types with visualization during the cardiocycle of the state of its electrical activity on the surface of the epicardium for diagnosing violations of conduction processes and the vector of the dipole moment for diagnosing myocardial ischemia. The specified combination of functional capabilities is a distinctive feature of the developed digital twin of the heart based on the equivalent electrical generators of the heart of the surface and dipole types. At the same time, texturing of the digital twin of the heart makes it possible to visualize the myocardial damage revealed as a result of diagnostics. *Materials and methods.* The research uses methods of mathematical modeling, intellectual methods of processing and computer visualization of modeling results. *Results and Conclusions.* The representation of the digital twin of the heart proposed by the authors makes it possible to visualize the electrical activity of the heart on the surface of the epicardium, which brings (in the presence of diagnostic information) the possibilities of functional diagnostics to those of computed tomography.

**Keywords:** heart, digital twin, equivalent electric generator of the heart of the surface and dipole types

**For citation:** Kramm M.N., Bezborodova O.E., Bodin O.N., Svetlov A.V. Digital heart double. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:73–84. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-9

### Актуальность

Математическое моделирование (ММ) в медицине применяют для изучения сложных физиологических процессов, диагностики патологических состояний, исследования взаимодействия систем организма в норме и патологии, при изучении эпидемических процессов, в клинической иммунологии. Наиболее известны: ММ возбуждения нервного волокна, предложенная А. Ходжкином и А. Хаксли [1], сердечной деятельности Д. Нобла [2], кровообращения Ф. Гродинза [3] и В. А. Лищука [4].

Преимущество использования ММ состоит в том, что оно позволяет исследовать поведение биологической системы в трудно воссоздаваемых в эксперименте или клинике условиях, при этом сокращают затраты и время исследования. Но ММ какого-либо объекта или процесса возможно тогда, когда достаточно хорошо изучены его физические и биологические закономерности.

Может быть, с этого начать? Цифровой двойник (ЦД) (англ. *Digital Twin*) представляет собой цифровую виртуальную модель физического объекта для имитации его функционирования (поведения). Определение спорное, лучше указать источник. Концепция ЦД основана на моделировании реальных объектов со всеми параметрами, функциональностью и поведением с использованием цифровых инструментов [5–7]. ЦД симулирует все возможные режимы работы объекта в течение его жизни, учитывает влияние внешних факторов и процессов управления, позволяет предсказывать будущее состояние и поведение физического объекта. ЦД основан на технологиях искусственного интеллекта, машинного обучения и аналитического программирования. Поэтому ЦД непрерывно обучается и обновляет свои параметры, получая информацию от устройств измерения текущих параметров реального объекта и внешней среды (при необходимости). Проведенный в работе [8] анализ показывает, что внедрение технологии ЦД может решить множество современных проблем, осуществляя переход к превентивной, профилактической и индивидуализированной медицине.

Имеет смысл привести какие-нибудь аналоги, тем более что есть русскоязычная информация о применении ЦД конкретно в медицине и даже о ЦД сердца.

Целью статьи является разработка ЦД сердца на основе объединения функциональных возможностей эквивалентных электрических генераторов сердца (ЭЭГС) поверхностного и дипольного типов.

### Постановка проблемы

При создании структуры ЦД использованы биологические принципы, механизмы формирования и использования виртуальных образов в сердечно-сосудистой системе человека, принципы организации биосистем третьего типа [9, 10, 11], интеллектуальные методы обработки и наглядного представления результатов анализа кардиографической информации, что, по мнению авторов, повышает возможности функциональной диагностики.

Традиционно для создания ЦД физических объектов применяют методы математической физики. Задача моделирования физического объекта представляется в виде набора крае-

вых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений и (или) дифференциальных уравнений в частных производных, например, для уравнений Эйлера – Лагранжа, Навье – Стокса. Основные подходы к решению таких задач – это сеточные методы и методы конечных элементов.

Генезис электрокардиосигнала (ЭКС) определяется процессами деполяризации (возбуждения) и реполяризации (расслабления или восстановления исходного состояния) в клетках миокарда [12]. Процесс возбуждения сначала распространяется по проводящей системе сердца (рис. 1), затем – по миокарду предсердий и желудочков. Процесс расслабления происходит в обратном порядке: сначала восстанавливается исходное состояние предсердий, затем – желудочков. В норме единственным водителем ритма является синусовый, или синоатриальный (СА), узел, который подавляет автоматическую активность остальных (эктопических) водителей ритма.

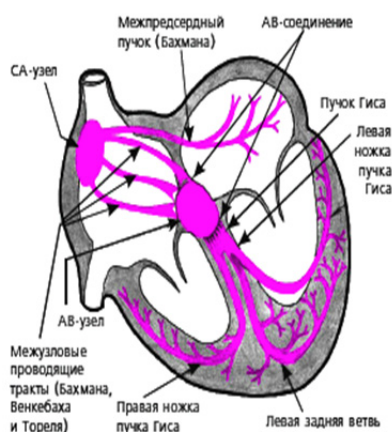


Рис. 1. Изображение проводящей системы сердца

Наглядно процесс генезиса ЭКС можно представить в виде условной схемы (рис. 2) [14].

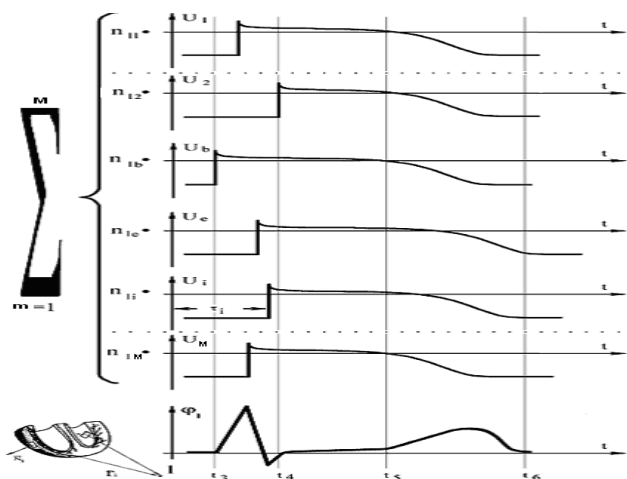


Рис. 2. Схема генезиса ЭКС

Чем больше площадь элемента  $\Delta S$ , тем меньше расстояние  $r$  от него до точки отведения и угол между  $r$  и нормалью  $N$  к  $\Delta S$  (что эквивалентно условию: чем больше телесный угол  $W$ , тем больше потенциал  $\Delta\phi$ , создаваемый этим элементом в точке отведения).

Знак  $\Delta\phi$ , плюс или минус, зависит от того, какая сторона элемента двойного слоя видна из точки наблюдения (точки отведения).

Для равномерно заряженного двойного слоя  $S$  произвольной формы величина потенциала определяется телесным углом, под которым из точки отведения виден край слоя, т.е. контур, на который этот двойной слой натянут.

С учетом изложенного в основе разработанного способа определения ЭАС лежит следующее выражение для определения потенциала  $\varphi_j(t)$  в  $i$ -й точке стандартного отведения:

$$\varphi_j(t) = \sum_{m_j} n_{m_j} \sum_{i=1}^n q_{ij} J_i(t - \tau_i). \quad (1)$$

Суть предлагаемого способа определения электрической активности сердца (ЭАС) [13] заключается в следующем: поверхность ЦД сердца задается опорными точками. Чем больше опорных точек, тем точнее ЦД аппроксимирует сердце пациента. Для аппроксимации поверхности ЦД сердца используется триангуляция Делоне. Для построения триангуляции точки поверхности соединяют прямыми, так, чтобы каждая точка стала вершиной треугольника, а каждый отрезок прямой – стороной треугольника (рис. 3). Таким образом, поверхность ЦД сердца человека изображается в виде совокупности плоских треугольных граней.

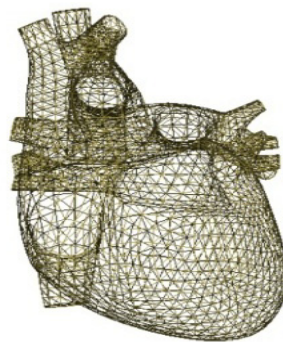


Рис. 3. Поверхность сердца, аппроксимированная плоскими треугольными гранями

### Результаты

Процесс создания эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС) (ЦД изменения ЭАС) приведен в работе [15] и включает определение антропометрических параметров торса и координат электродов в трехмерной системе с центром в области атриовентрикулярного узла сердца, установку электродов и регистрацию ЭКС, проведение интерполяции потенциалов на поверхности торса, расчет распределения потенциала и его нормальной производной на поверхности вспомогательного внутреннего эллиптического цилиндра, определение пространственного распределения ЭАС, суммарного по всему кардиоциклу и по интервалу  $P$ -зубца, вычисление координаты центра модели эпикарда пациента и центра модели предсердий пациента.

На основе полученных данных сначала проводят реконструкцию ЭЭГС поверхностного типа следующим образом. Рассчитывают распределение потенциала и его нормальной производной на поверхности реконструированной модели эпикарда пациента для временных отсчетов кардиоцикла от начала  $P$ -зубца до конца  $T$ -зубца итерационным методом Зейделя по формулам

$$\begin{aligned} [G^{eb}]g^e - [H^{eb}]\varphi^e &= [H^{bb}]\varphi^b; P_j \in S_b; j=1 \dots N_b; \\ [G^{ee}]g^e - [H^{ee}]\varphi^e &= [H^{be}]\varphi^b; P_i \in S_{ce}; i=1 \dots N_e, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $P_j$  – точка на поверхности торса  $S_b$ ;  $P_i$  – точка на поверхности внутреннего эллиптического цилиндра  $S_e$ .

Векторы потенциалов поверхности модели эпикарда и производных потенциалов по направлению нормали к поверхности модели эпикарда пациента определяют по формулам

$$\varphi^e = (\varphi_1^e, \dots, \varphi_{N_e}^e); \quad (3)$$

$$g^e = (d\varphi_1^e / dn, \dots, d\varphi_{N_e}^e / dn). \quad (4)$$

Векторы потенциалов на поверхности торса определяют по формулам

$$\begin{aligned}
 \Phi^b &= (\Phi_1^b, \dots, \Phi_{N_b}^b); \\
 G_{ji'}^{eb} &= (1/R_{ji'}) \Delta S_{i'}; \\
 H_{ji'}^{eb} &= [d(1/R_{ji'})/dn_e] \Delta S_{i'}; \\
 G_{ii'}^{ee} &= (1/R_{ii'}) \Delta S_{i'}; i \neq i'; \\
 H_{ii'}^{ee} &= [d(1/R_{ii'})/dn_e] \Delta S_{i'}; i \neq i'; \\
 H_{jj'}^{bb} &= [d(1/R_{jj'})/dn_b] \Delta S_{j'}; j \neq j'; \\
 H_{jj'}^{bc} &= [d(1/R_{ij})/dn_b] \Delta S_{j'}; j \neq j',
 \end{aligned} \tag{5}$$

где  $R_{ji} = |P_j P_i|$  – элементы матриц, входящих в систему линейных матричных уравнений.

Проводят контроль сходимости итерационного процесса при расчете распределения потенциала на эпикарде и точности аппроксимации потенциалов на торсе для  $i$ -й итерации по формулам

$$\begin{aligned}
 \frac{\Phi^{e(m+1)} - \Phi^{e(m)}}{\Phi^{e(m+1)}} &< \varepsilon; \\
 \frac{g^{e(m+1)} - g^{e(m)}}{g^{e(m+1)}} &< \varepsilon; \\
 \frac{\Phi^{b(m+1)} - \Phi^{b(m)}}{\Phi^b} &< \delta,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $\varepsilon$  и  $\delta$  – малые положительные безразмерные величины.

Значения  $\Phi^{e(l+1)}$ ,  $g^{e(l+1)}$ ,  $\Phi^{b(l)}$  определяют по формулам

$$\begin{aligned}
 \Phi^{e(l+1)} &= [H^{ee}]^{-1} ([G^{ee}] g^{e(l)} - [H^{be}] \Phi^b); \\
 g^{e(l+1)} &= [G^{eb}]^{-1} ([H^{eb}] \Phi^{e(l+1)} + [H^{bb}] \Phi^b); \\
 \Phi^{b(l)} &= [H^{bb}]^{-1} ([G^{eb}] g^{e(l)} - [H^{eb}] \Phi^{e(l)}).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Результаты реконструкции ЭЭГС поверхностного типа для данных моментов времени представлены на рис. 4 в виде карт распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда.

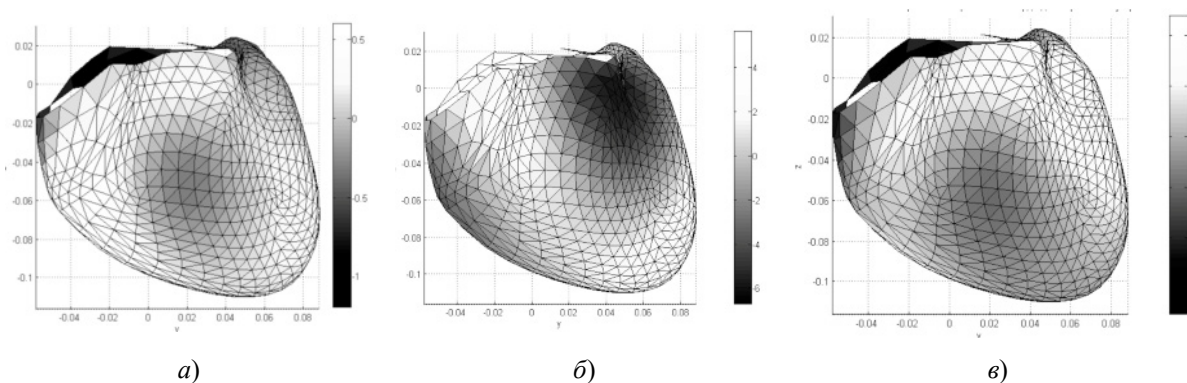


Рис. 4. Потенциал на поверхности эпикарда для вершины:  
а – P-зубца; б – R-зубца; в – T-зубца

Для большей наглядности полутоновая палитра на представленных рисунках выбрана с одинаковым контрастом, который соответствует различным диапазонам изменения электрического потенциала в милливольтках. Как и следовало ожидать, наибольшие значения потенциала наблюдаются для вершины *R*-зубца, наименьшие – для вершины *P*-зубца.

Наиболее заметна дипольная структура электрического источника для *R*-зубца. Располагая значениями потенциалов в различные моменты времени кардиоцикла, можно наблюдать ЭКС непосредственно на поверхности эпикарда.

Для расширения диагностических возможностей способа предлагается проводить дополнительно реконструкцию ЭЭГС дипольного типа (рис. 5). Временная динамика поведения ЭЭГС дипольного типа в ходе кардиоцикла может наглядно отображаться пространственными кривыми, характеризующими движение источника в пространстве и движение конца вектора дипольного момента. В качестве примера на рис. 6 показаны треки – линии движения источника для *P*-, *R*- и *T*-зубцов во фронтальной плоскости.

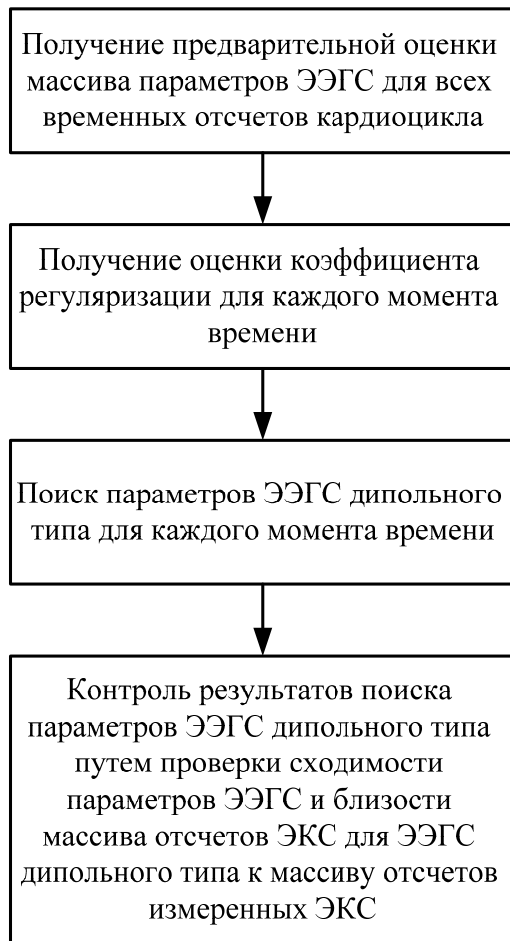


Рис. 5. Этапы реконструкции ЭЭГС дипольного типа



Рис. 6. Треки движения ЭЭГС дипольного типа во фронтальной плоскости для обследуемого с ишемической болезнью сердца

При реконструкции ЭЭГС дипольного типа для всех временных отсчетов кардиоцикла  $t_k (k \in (k_{b0} \dots k_{e0}))$   $s_{0k}$  характеризуется вектором параметров:

$$s_{0k} = (x_{s0k}, y_{s0k}, z_{s0k}, M_{x0k}, M_{y0k}, M_{z0k}), \quad (8)$$

где  $(x_s, y_s, z_s)$  – координаты ЭЭГС;  $(M_x, M_y, M_z)$  – проекции вектора дипольного момента ЭЭГС, определяемые путем поиска минимума функционала

$$\Omega_0 = U - \tilde{U}(s_{0k})^2, \quad (9)$$

где  $U = (U_1, \dots, U_n, \dots, U_{N_1})$ ;  $U_n$  – ЭКС, снимаемый с  $i$ -го электрода;  $\tilde{U}(s) = (U_{1s}, \dots, U_{ns}, \dots, U_{N_1s})$ ,  $U_{ns}$  – сигнал дипольного ЭЭГС с параметрами  $s_{0k}$ , рассчитанный для  $i$ -го электрода.

Оценка коэффициента регуляризации  $\alpha_k$  для каждого момента времени  $t_k$  проводится по формуле

$$\alpha_k = C_M \frac{U_k - \tilde{U}_k(s_{0k})^2}{(1/N_k) \sum_{k=k_{bo}}^{k_{eo}} s_{0k}'^2}, \quad (10)$$

где  $C_M$  – масштабный коэффициент регуляризации  $C_M \in (0, 5; 1, 5)$ ; нормированный массив оценок параметров ЭЭГС описывается выражением

$$s_{0k}' = \left( \frac{x_{s0k} - x_{ce}}{R_H}, \frac{y_{s0k} - y_{ce}}{R_H}, \frac{z_{s0k} - z_{ce}}{R_H}, \frac{M_{x0k}}{M_H}, \frac{M_{y0k}}{M_H}, \frac{M_{z0k}}{M_H} \right), \quad (11)$$

где  $(x_{ce}, y_{ce}, z_{ce})$  – координаты центра модели эпикарда пациента;  $R_H \cong 6$  см – усредненный радиус эпикарда.

Модуль вектора дипольного момента ЭЭГС определяют по формуле

$$M_H = \sqrt{(M_{x0R})^2 + (M_{y0R})^2 + (M_{z0R})^2}, \quad (12)$$

где  $M_H, M_{x0k}, M_{y0k}, M_{z0k}$  – соответственно модуль и проекции вектора дипольного момента ЭЭГС дипольного типа для временного отсчета максимума  $R$ -зубца кардиоцикла.

Далее осуществляют поиск параметров ЭЭГС дипольного типа

$$s_k = (x_{sk}, y_{sk}, z_{sk}, M_{xk}, M_{yk}, M_{zk}) \quad (13)$$

для каждого момента времени  $t_k$  путем минимизации функционала:

$$\Omega_\alpha = U - \tilde{U}(s_k)^2 + \alpha_k s_k'^2, \quad (14)$$

где нормированный массив параметров ЭЭГС дипольного типа:

$$s_k' = \left( \frac{x_{sk} - x_{ce}}{R_H}, \frac{y_{sk} - y_{ce}}{R_H}, \frac{z_{sk} - z_{ce}}{R_H}, \frac{M_{xk}}{M_H}, \frac{M_{yk}}{M_H}, \frac{M_{zk}}{M_H} \right). \quad (15)$$

После чего так же контролируют результаты поиска параметров ЭЭГС дипольного типа путем проверки сходимости параметров ЭЭГС и близости массива отсчетов ЭКС для ЭЭГС дипольного типа к массиву отсчетов измеренных ЭКС по формулам

$$\frac{\Omega^{(m)} - \Omega^{(m-1)}}{\Omega_\alpha^{(m)}} < \varepsilon_1; \quad (16)$$

$$\frac{U_n - \tilde{U}_n^{(m)}(s)}{U_n} < \delta_1,$$

где  $m$  – номер итерации в процессе поиска минимума функционала  $\Omega_\alpha$ ;  $\varepsilon_1$  и  $\delta_1$  – малые положительные безразмерные величины.

Приведенные алгоритмы ориентированы на анализ динамики ЭАС путем пространственно-временного картирования эквивалентных электрических источников сердца и позволяют диагностировать нарушения процессов проводимости и ишемическую болезнь сердца.

Алгоритм наложения текстуры приведен на рис. 7 [18].

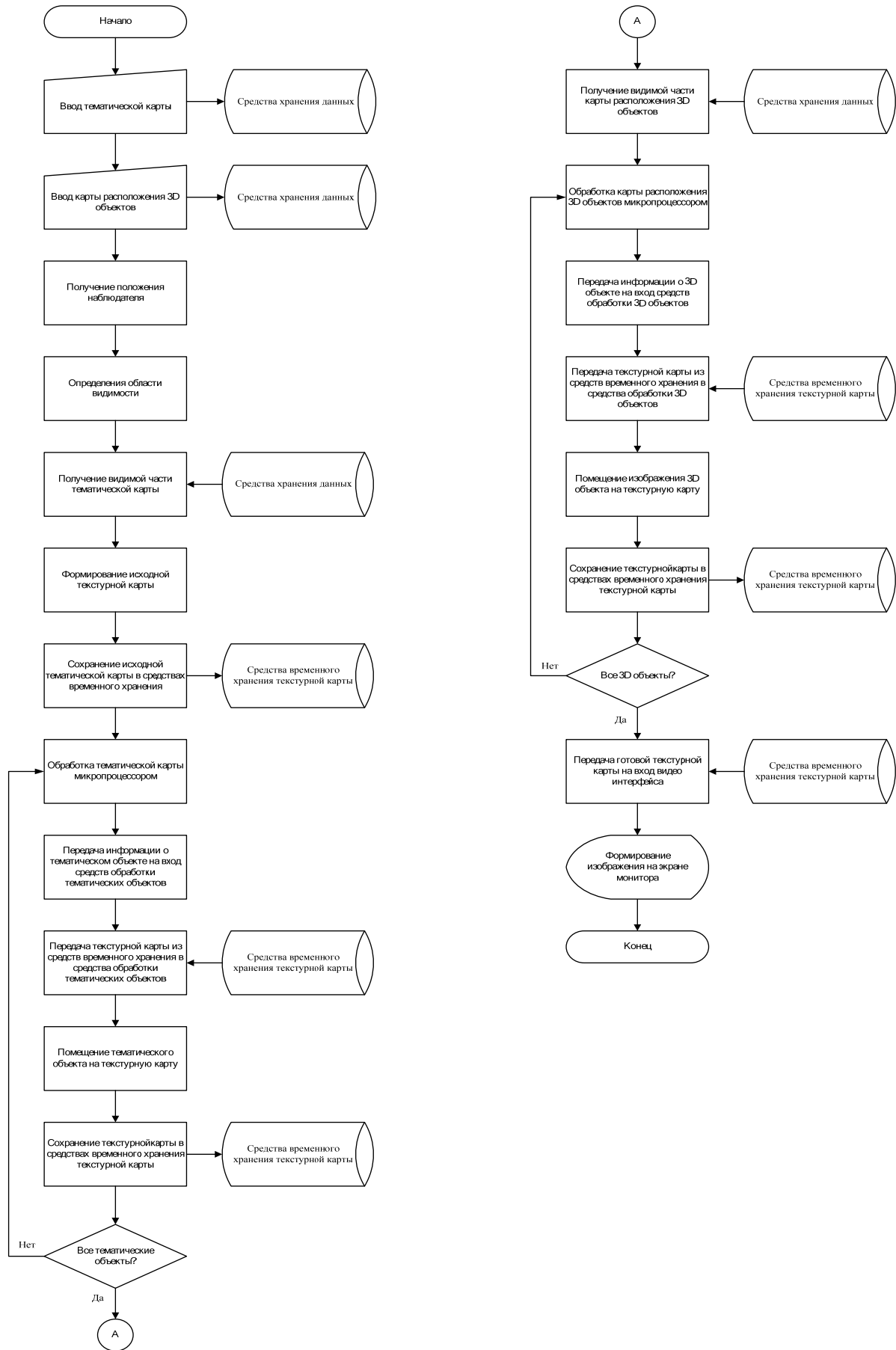


Рис. 7. Алгоритм наложения текстуры



Текстура является удобным инструментом отображения состояния сердца, так как наглядно показывает на поверхности сердца место возможного повреждения. Генерирование текстуры в реальном масштабе времени относится, наряду с визуализацией объемов в реальном масштабе времени, к фундаментальным задачам компьютерной графики [16, 17].

Суть процесса наложения текстуры заключается в том, что в реальном масштабе времени предварительно составляют карту расположения тематических объектов на текстуре, формируют и хранят тематические данные (различные образцы текстуры) и составляют текстурную карту из тематических объектов.

Текстурная карта представляет собой множество тематических объектов, которые можно модифицировать в реальном масштабе времени, например, изменять размер, местоположение и маску. Под тематическими данными понимается образец текстуры.

Генерирование текстуры в реальном масштабе времени основано на новом принципе аппроксимации границы «стыковки» тематических данных при составлении текстурной карты: формирование тематических объектов из тематических данных и генерирование текстурной карты из тематических объектов осуществляется путем операции наложения по маске.

В качестве текстуры используются двумерные изображения. Разработанный формирователь геометрических элементов изображения описан в работе [19] и позволяет формировать сложные графические изображения. При построении трехмерной модели сердца используется текстура размером 512×256 пикселей.

Иллюстрация этапов генерирования текстурной карты приведена на рис. 8.

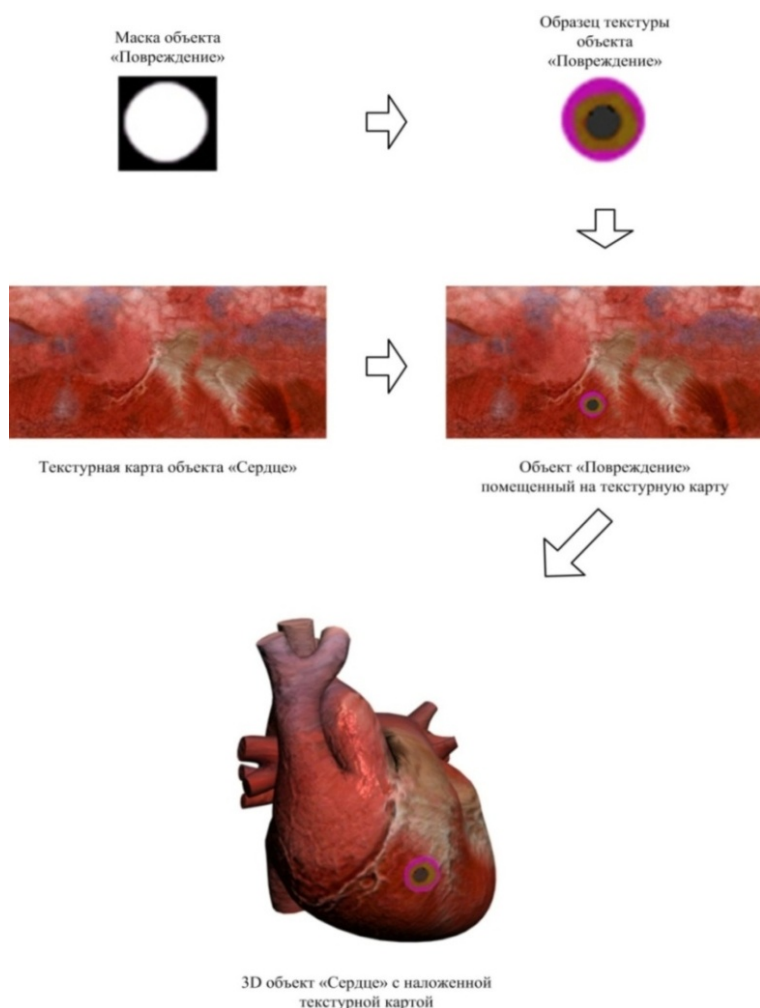


Рис. 8. Иллюстрация этапов генерирования текстурной карты

Для визуализации повреждений миокарда на синтезированном изображении ЦД сердца создаются дополнительные текстурные карты, отражающие соответствующие заболевания.

Каждая такая карта содержит изображение трех зон повреждений, отмеченных соответствующим цветом: например, черным цветом обозначена зона некроза, темно-зеленым цветом – зона повреждения и сиреневым цветом – зона ишемии.

### *Заключение*

С целью расширения диагностических возможностей электрокардиологии пространственно-временные характеристики ЭАС на поверхности эпикарда, полученные с помощью ЭЭГС поверхностного типа, дополнены пространственно-временными характеристиками электрической активности в объеме сердца, полученные с помощью ЭЭГС дипольного типа. Таким образом, получаем изменяющиеся во времени в течение кардиоцикла значения электрического потенциала на поверхности эпикарда для диагностики нарушений процессов проводимости и значения координат и вектора дипольного момента ЭЭГС дипольного типа, необходимые для диагностики ишемии. При этом текстурирование ЦД сердца позволяет визуализировать выявленное в результате диагностики повреждение миокарда.

Предложенное авторами представление ЦД сердца позволяет визуализировать электрическую активность сердца, что приближает (при наличии диагностической информации) возможности функциональной диагностики к возможностям компьютерной томографии.

### *Список литературы*

1. Hodgkin A. L., Huxley A. F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // *J. Physiol.* 1952. Vol. 117. P. 500–544.
2. Noble D. A modification of the Hodgkin – Huxley equations applicable to Purkinje fibre action and pacemaker potentials // *J. Physiol.* 1962. Vol. 160. P. 317–352.
3. Гродинз Ф. Теория регулирования и биологические системы. М. : Мир, 1966. 254 с.
4. Лишук В. А. Математическая теория кровообращения. М. : Медицина, 1991. 265 с.
5. Uhlemann T. H.-J., Steinhilper C. L. R., Steinhilper R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4 // *Procedia CIRP.* 2017. Vol. 61. Part of special issue: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. P. 335–340. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.152
6. Uhlemann T. H.-J., Schock C., Lehmann C. [et al.]. The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems // *Procedia Manufacturing.* 2017. Vol. 9. P. 113–120. doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.043
7. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect / ed. by P. Hehenberger, D. Bradley // *Mechatronic Futures.* 2016. P. 59–74. doi: 10.1007/978-3-319-32156-1\_5
8. Мадалиев А., Иванов В. М. Аддитивные технологии и цифровые двойники: из промышленности в медицину // *Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения.* 2019. Т. 14, № 1. С. 229–234.
9. Еськов В. М., Филатова О. Е., Хадарцев А. А., Хадарцева К. А. Пять принципов функционирования сложных систем, систем третьего типа // *Вестник новых медицинских технологий.* 2015. № 1. Публикация 1-2. doi: 10.12737/10410. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5123.pdf>
10. Еськов В. М., Еськов В. В., Гавриленко Т. В., Вохмина Ю. В. Кинематика биосистем как эволюция: стационарные режимы и скорость движения сложных систем – complexity // *Вестник Московского университета. Сер. 3, Физика. Астрономия.* 2015. № 2. С. 62–73.
11. Еськов В. М., Филатова О. Е., Еськов В. В., Гавриленко Т. В. Эволюция понятия гомеостаза: детерминизм, стохастика, хаос-самоорганизация // *Биофизика.* 2017. Т. 62, вып. 5. С. 984–997.
12. Орлов В. Н. Руководство по электрокардиографии. М. : Медицина, 1984. 528 с.
13. Патент № 2360597 Российская Федерация, А61В 5/0402 (2006.01). Способ определения электрической активности сердца / Бодин О. Н., Гладкова Е. А., Кузьмин А. В., Митрохина Н. Ю., Мулюкина Л. А. № 2007111788/14 : заявл. 02.04.2007 : опубл. 10.07.2009. 33 с.
14. Баум О. В., Попов Л. А., Волошин В. И. [и др.]. QT-дисперсия: модели и измерения // *Вестник аритмологии.* 2000. № 20. С. 6–17.
15. Патент № 2651068 Российская Федерация, А61В 5/0402 (2006.01), G06N 7/06 (2006.01). Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Жихарева Г. В., Крамм М. Н., Палюткина Ю. А., Стрелков Н. О., Черников А. И. № 2017123613 : заявл. 05.07.2017 : опубл. 18.04.2018. 40 с.
16. Эйнджел Э. Интерактивная компьютерная графика. Вводный курс на базе OpenGL : пер. с англ. 2-е изд. М. : Вильямс, 2001. 592 с.
17. Гайдуков С. А. OpenGL. Профессиональное программирование трехмерной графики на C++. СПб. : БХВ-Петербург, 2004. 736 с.

18. Патент № 2295772 Российская Федерация. Способ генерирования текстуры в реальном масштабе времени и устройство для его реализации / Бодин О. Н. [и др.]. 26.09.2005.
19. Авторское свидетельство СССР № 1354243. Устройство для отображения информации на экране цветного телевизионного индикатора / Бодин О. Н., Ломтев Е. А., Майоров Б. Г. 11.01.1985. МКИ4 G09G1/28.

### References

1. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *J. Physiol.* 1952;117:500–544.
2. Noble D. A modification of the Hodgkin – Huxley equations applicable to Purkinje fibre action and pace – maker potentials. *J. Physiol.* 1962;160:317–352.
3. Grodzin F. *Teoriya regulirovaniya i biologicheskie sistemy = Regulatory theory and biological systems.* Moscow: Mir, 1966:254. (In Russ.)
4. Lishchuk V.A. *Matematicheskaya teoriya krovoobrashcheniya = Mathematical theory of blood circulation.* Moscow: Meditsina, 1991:265. (In Russ.)
5. Uhlemann T.H.-J., Steinhilper C.L.R., Steinhilper R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4. *Procedia CIRP.* 2017. Vol. 61. Part of special issue: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. 2017:335–340. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.152
6. Uhlemann T.H.-J., Schock C., Lehmann C. [et al.]. The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. *Procedia Manufacturing.* 2017;9:113–120. doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.043
7. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect. *Mechatronic Futures.* 2016:59–74. doi: 10.1007/978-3-319-32156-1\_5
8. Madaliev A., Ivanov V.M. Additive technologies and digital doubles: from Industry to medicine. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya = Health – the basis of human potential: problems and ways to solve them.* 2019;14(1):229–234. (In Russ.)
9. Es'kov V.M., Filatova O.E., Khadartsev A.A., Khadartseva K.A. Five principles of functioning of complex systems, systems of the third type. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy = Bulletin of new medical technologies.* 2015;1. Publication 1-2. doi: 10.12737/10410. Available at: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-1/5123.pdf>. (In Russ.)
10. Es'kov V.M., Es'kov V.V., Gavrilenko T.V., Vokhmina Yu.V. Kinematics of biosystems as evolution: stationary modes and speed of motion of complex systems – complexity. *Vestnik moskovskogo universiteta. Ser. 3, Fizika. Astronomiya = Bulletin of the Moscow University. Ser. 3, Physics. Astronomy.* 2015;2:62–73. (In Russ.)
11. Es'kov V.M., Filatova O.E., Es'kov V.V., Gavrilenko T.V. Evolution of the concept of homeostasis: determinism, stochastics, chaos-self-organization. *Biofizika = Biophysics.* 2017;62(5):984–997. (In Russ.)
12. Orlov V.N. *Rukovodstvo po elektrokardiografii = Manual of Electrocardiography.* Moscow: Meditsina, 1984:528. (In Russ.)
13. Patent № 2360597 Russian Federation, A61B 5/0402 (2006.01). *Sposob opredeleniya elektricheskoy aktivnosti serdtsa = Method for determining the electrical activity of the heart.* Bodin O. N., Gladkova E. A., Kuz'min A. V., Mitrokhina N. Yu., Mulyukina L. A. № 2007111788/14: appl. 02.04.2007: publ. 10.07.2009. (In Russ.)
14. Baum O.V., Popov L.A., Voloshin V.I., Muromtseva G.A. QT-variance: models and measurements. *Vestnik aritmologii = Bulletin of Arrhythmology.* 2000;20:6–17. (In Russ.)
15. Patent № 2651068 Russian Federation, A61B 5/0402 (2006.01), G06N 7/06 (2006.01). *Sposob neinvazivnogo opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa = Method of noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart.* Bodin O. N., Bodin A. Yu., Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Palyutina Yu. A., Strelkov N. O., Chernikov A. I. № 2017123613: appl. 05.07.2017: publ. 18.04.2018. (In Russ.)
16. Eyndzhel E. *Interaktivnaya komp'yuternaya grafika. Vvodnyy kurs na baze OpenGL: per. s angl. 2-e izd. = Interactive computer graphics. Introductory course based on OpenGL: trans. from English. 2nd ed.* Moscow: Vil'yams, 2001:592. (In Russ.)
17. Gaydukov S.A. *OpenGL. Professional'noe programmirovaniye trekhmernoy grafiki na C++ = OpenGL. Professional programming of three-dimensional graphics in C++.* Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2004:736. (In Russ.)
18. Patent № 2295772 Russian Federation. *Sposob generirovaniya tekstury v real'nom masshtabe vremeni i ustroystvo dlya ego realizatsii = A method for generating a texture in real time and a device for implementing it.* Bodin O. N. [et al.]. 26.09.2005. (In Russ.)
19. *Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1354243. Ustroystvo dlya otobrazheniya informatsii na ekrane tsvetnogo televizionnogo indikatora = Device for displaying information on the screen of a color television indicator.* Bodin O. N., Lomtev E. A., Mayorov B. G. 11.01.1985. МКИ4 G09G1/28. (In Russ.)

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

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

**Оксана Евгеньевна Безбородова**

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

**Олег Николаевич Бодин**

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

**Анатолий Вильевич Светлов**

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

**Mikhail N. Kramm**

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

**Oksana E. Bezborodova**

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

**Oleg N. Bodin**

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

**Anatoliy V. Svetlov**

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

УДК 621.317.791

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-10

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТЕЛЕМЕДИЦИНСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ БОЛЬНОГО COVID-19

В. А. Баранов<sup>1</sup>, Е. А. Печерская<sup>2</sup>, М. И. Сафронов<sup>3</sup>, О. А. Тимохина<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup>baranov\_va2202@mail.ru, <sup>2</sup>peal@list.ru, <sup>3</sup>safronov.maxim@inbox.ru, <sup>4</sup>timokhina.olga.14.12@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальность применения телемедицинских технологий резко возросла в условиях пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19. В связи с высокой загруженностью стационаров Минздрав России рекомендовал регионам организовать медицинскую помощь с применением телемедицинских технологий пациентам с подтвержденным COVID-19 на дому. Существующие телемедицинские информационно-коммуникационные системы позволяют осуществлять только запись на прием к врачу в клинике, дистанционные консультации больного (вторичный прием) и не имеют в своем составе средств измерений для непрерывного дистанционного наблюдения (мониторинга) состояния больного. Это определяет актуальность задачи дополнения существующих телемедицинских информационно-коммуникационных систем персонализированной информационно-измерительной системой для мониторинга состояния больного. *Материалы и методы.* Информационно-измерительная система разработана в полном соответствии с требованиями последних руководящих документов Минздрава РФ и Временных методических рекомендаций по профилактике, диагностике и лечению новой коронавирусной инфекции COVID-19 (Версия 9, 26.10.2020). *Результаты.* Разработана информационно-измерительная система для телемедицинского мониторинга состояния больного COVID-19. В ее состав входят основные (измерения температуры тела, показателей гемодинамики и дыхания) и дополнительные (измерения систолического и диастолического артериального давления, гликемии и показателей электрической активности сердца) измерительные каналы. Основные каналы применяются для лечения COVID-19, дополнительные – при наличии у больного COVID-19 хронических заболеваний. Представлен возможный вариант реализации информационно-измерительной системы на основе имеющихся на рынке отечественных средств измерений. *Вывод.* Предложенная информационно-измерительная система, функционирующая в составе информационно-коммуникационной системы, обеспечивает телемедицинский мониторинг состояния больного COVID-19 в полном соответствии с последними руководящими документами Минздрава РФ и Временными методическими рекомендациями по профилактике, диагностике и лечению новой коронавирусной инфекции COVID-19.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, мониторинг, телемедицинские технологии, коронавирусная инфекция COVID-19, электрокардиография, пульсовая оксиметрия, гемодинамика, сатурация крови

**Для цитирования:** Баранов В. А., Печерская Е. А., Сафронов М. И., Тимохина О. А. Информационно-измерительная система для телемедицинского мониторинга состояния больного COVID-19 // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 85–92. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-10

## INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR TELE-HEALTH MONITORING OF COVID-19 PATIENT'S CONDITION

V.A. Baranov<sup>1</sup>, E.A. Pecherskaya<sup>2</sup>, M.I. Safronov<sup>3</sup>, O.A. Timokhina<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup>baranov\_va2202@mail.ru, <sup>2</sup>peal@list.ru, <sup>3</sup>safronov.maxim@inbox.ru, <sup>4</sup>timokhina.olga.14.12@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The relevance of the use of telemedicine technologies has increased sharply in the context of the pandemic of the new coronavirus infection COVID-19. Due to the high workload of hospitals, the Russian Ministry of Health recommended that the regions organize medical care using telemedicine technologies for patients with confirmed COVID-19 at home. Existing telemedicine information and communication systems only allow making an appointment with a doctor in a clinic, remote consultations of a patient (secondary appointment) and do not include measuring instruments for continuous remote observation (monitoring) of a patient's condition. This determines the

urgency of the task of supplementing the existing telemedicine information and communication systems with a personalized information and measuring system for monitoring the patient's condition. *Materials and methods.* The information-measuring system was developed in full compliance with the requirements of the latest guidelines of the Ministry of Health of the Russian Federation and the Temporary Guidelines for the Prevention, Diagnosis and Treatment of the New Coronavirus Infection COVID-19 (Version 9, 10/26/2020). *Results.* An information-measuring system for telemedicine monitoring of the patient's condition with COVID-19 has been developed. It includes the main (measurements of body temperature, hemodynamic and respiration indicators) and additional (measurements of systolic and diastolic blood pressure, glycemia and indicators of the electrical activity of the heart) measuring channels. The main channels are used to treat COVID-19, additional channels are used if a patient with COVID-19 has chronic diseases. A possible version of the information-measuring system implementation based on the domestic measuring instruments available on the market is presented. *Conclusion.* The proposed information and measurement system, functioning as part of the information and communication system, provides telemedicine monitoring of the patient's condition with COVID-19 in full compliance with the latest guidelines of the Ministry of Health of the Russian Federation and the Interim Guidelines for the Prevention, Diagnosis and Treatment of New Coronavirus Infection COVID-19.

**Keywords:** information-measuring system, monitoring, tele-health technologies, CoronaVirus Disease 2019, electrocardiography, pulse ox, hemodynamics, blood saturation

**For citation:** Baranov V.A., Pecherskaya E.A., Safronov M.I., Timokhina O.A. Information-measuring system for telehealth monitoring of COVID-19 patient's condition. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:85–92. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-10

### Введение

Федеральный закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам применения информационных технологий в сфере охраны здоровья» ввел понятие «телемедицинские технологии» [1]. Телемедицинские технологии – информационные технологии, обеспечивающие дистанционное взаимодействие медицинских работников между собой, с пациентами и (или) их законными представителями, идентификацию и аутентификацию указанных лиц, документирование совершаемых ими действий при проведении консилиумов, консультаций, дистанционного медицинского наблюдения за состоянием здоровья пациента.

Телемедицинские технологии реализуются информационно-коммуникационными системами (ИКС) [2, 3]. Данные ИКС позволяют осуществлять только запись на прием к врачу в клинике, дистанционные консультации больного (вторичный прием) и не имеют в своем составе средств измерений для непрерывного дистанционного наблюдения (мониторинга) состояния больного. Необходимость применения телемедицинских технологий резко возросла в условиях пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 (далее – COVID-19). В связи с высокой загруженностью стационаров Минздрав России рекомендовал регионам организовать медицинскую помощь с применением телемедицинских технологий пациентам с подтвержденным COVID-19 на дому [4]. По сообщению Роспотребнадзора, опубликованному на портале «стопкоронавирус.рф», «длительность течения COVID-19 зависит от того, в какой форме проходит заболевание. Если болезнь протекает в легкой форме, продолжительность заболевания составляет около двух недель. Такие пациенты, как правило, не госпитализируются и лечатся амбулаторно».

Это определяет актуальность задачи дополнения существующих телемедицинских ИКС персонифицированной информационно-измерительной системой (ИИС) для мониторинга состояния больного.

### *Информационно-коммуникационная система для телемедицинского мониторинга больных COVID-19 на дому*

ИКС для лечения на дому больных COVID-19 реализуется путем установки у каждого больного персонифицированной ИИС и подключения ее к имеющимся у больного средствам приема-передачи информации (СППрИ) через канал связи (КС). Структура ИКС для мониторинга состояния больных COVID-19 представлена на рис. 1.

В состав ИКС входят персонифицированный информационный канал (ПИК) больного  $N$ , подсистема приема информации и оценивания состояния больного  $N$  врачом и подсистема управления.

ПИК каждого больного включает в себя ИИС, СППрИ, КС. Подсистема приема информации и оценивания состояния  $N$ -го больного врачом состоит из персонального СППрИ врача и самого врача, формирующего оценку состояния  $N$ -го больного. Подсистема управления включает в себя персонифицированные каналы управления (ПКУ) лечением  $N$ -го больного, а также каналы управления (КУ) аптекой, участковым врачом, скорой медицинской помощью, формирующими группу объектов управления.

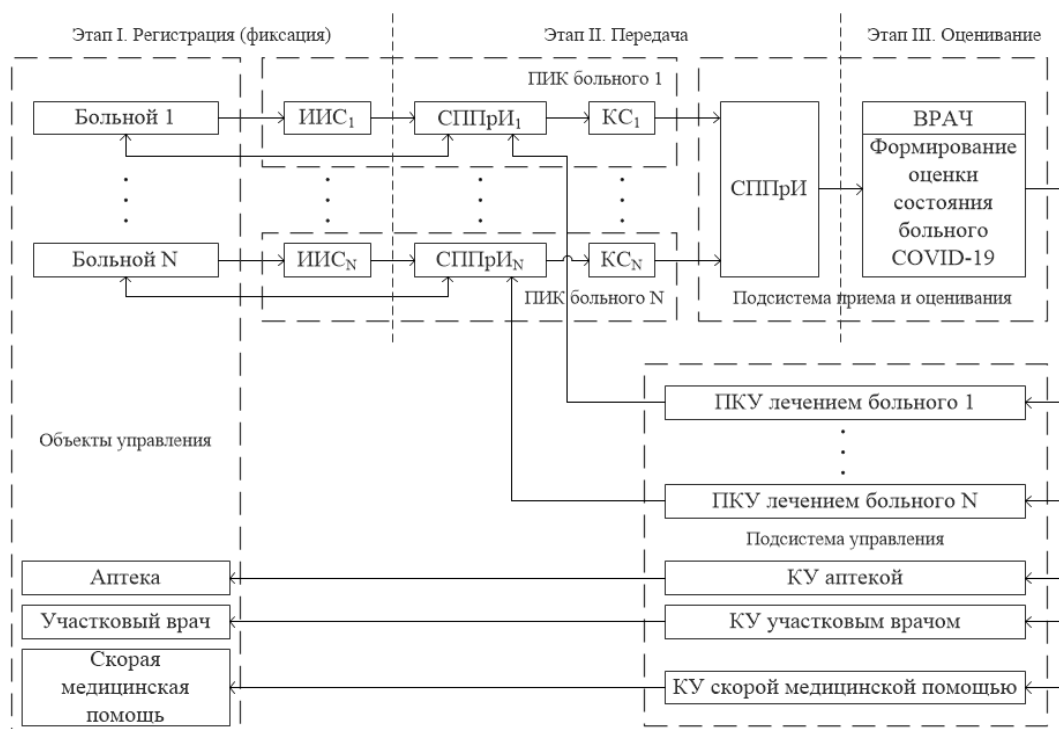


Рис. 1. Структура ИКС для мониторинга состояния больных COVID-19

В соответствии с ГОСТ Р 57757–2017 [5], дистанционный мониторинг состояния больного осуществляется в три этапа:

- 1-й этап – измерения и регистрация показателей;
- 2-й этап – передача информации;
- 3-й этап – оценка состояния больного врачом.

Первый этап реализуется ИИС. В соответствии с Временными методическими рекомендациями по профилактике, диагностике и лечению новой коронавирусной инфекции COVID-19 (Версия 9, 26.10.2020) [6] измеряемыми показателями больного являются температура тела, частота дыхательных движений, сатурация крови кислородом. Результаты измерений показателей регистрируются в памяти ИИС. Второй этап заключается в передаче зарегистрированной информации врачу по его запросу с помощью СППрИ через КС. Третий этап дистанционного мониторинга состоит в анализе врачом полученной информации и формировании оценки состояния больного. На основе полученной оценки врач принимает ряд управляющих решений. Среди них могут быть: рекомендации больному по корректировке процесса лечения, указание аптеке о выдаче больному лекарств в соответствии с электронным рецептом, указание участковому врачу о необходимости посещения больного. При необходимости срочной госпитализации врач дает соответствующее указание скорой медицинской помощи о необходимости транспортировать больного в стационар.

### **Информационно-измерительная система для телемедицинского мониторинга больных COVID-19 на дому**

Главным компонентом информационного канала ИКС является ИИС. Структура системы представлена на рис. 2. Система содержит основные измерительные каналы (ОИК) (для всех больных) и дополнительные измерительные каналы (ДИК) (для особых групп больных).

В соответствии с ОИК являются каналы измерения температуры, показателей гемодинамики, показателей дыхания [6].

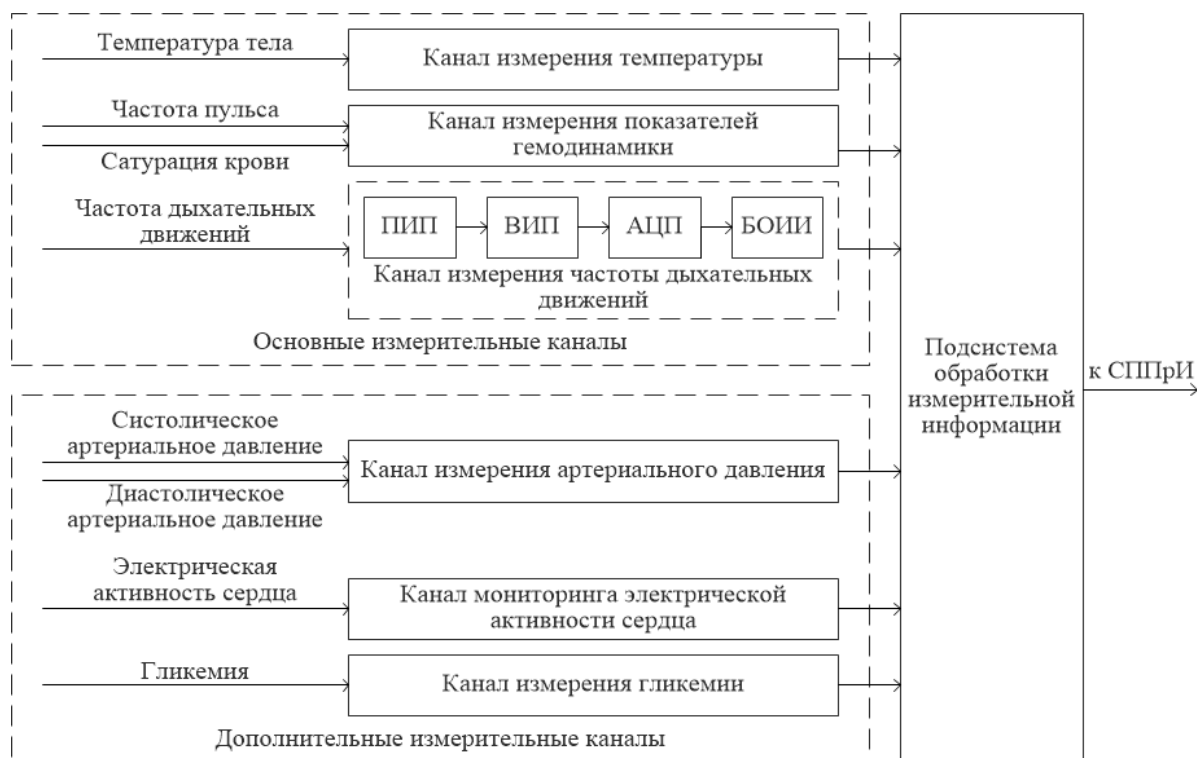


Рис. 2. Структура ИИС для мониторинга состояния больного COVID-19

Персонализация функций ИИС зависит от тяжести состояния больного COVID-19, отнесения его к одной или нескольким особым группам и осуществляется путем организации ДИК. Состав ДИК определяется врачом после первичного приема. Типичными ДИК могут быть канал измерения систолического и диастолического артериального давления (артериальная гипертензия), показателей электрической активности сердца (ЭАС) (сердечно-сосудистые заболевания), гликемии (сахарный диабет).

Каждый измерительный канал должен иметь:

- 1) беспроводной канал передачи измерительной информации подсистеме обработки измерительной информации по протоколу Bluetooth Low Energy на расстоянии до 10 м;
- 2) батарейное питание;
- 3) возможность закрепления на теле больного.

Метрологические характеристики ОИК и ДИК представлены в табл. 1 и 2 соответственно. Возможные варианты реализации измерительных каналов представлены в табл. 3.

Таблица 1

Метрологические характеристики основных измерительных каналов

Основной измерительный канал	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Пределы допускаемой абсолютной погрешности результатов измерений
Канал измерения температуры	Температура $t$ , °C	25–45	±0,1
Канал измерения показателей гемодинамики	Частота пульса ЧП, мин <sup>-1</sup>	30–250	±2
	Сатурация крови SpO <sub>2</sub> , %	80–100 70–79	±2 ±3
Канал измерения частоты дыхательных движений	Частота дыхательных движений ЧДД, мин <sup>-1</sup>	10–60	±2



Таблица 2

## Метрологические характеристики дополнительных измерительных каналов

Дополнительный измерительный канал	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Характеристики точности
Канал измерения артериального давления	Систолическое артериальное давление САД, мм рт.ст.	20–290	Пределы допускаемой абсолютной погрешности результатов измерений: $\pm 3$
	Диастолическое артериальное давление ДАД, мм рт.ст.	20–290	Пределы допускаемой абсолютной погрешности результатов измерений: $\pm 3$
Канал измерения гликемии	Уровень глюкозы крови, ммоль/л	1,1–27,8	Коэффициент вариации результатов измерений: не более 4,0 %

Таблица 3

## Возможные варианты реализации измерительных каналов

Основной измерительный канал	Прибор	Источник информации
Канал измерения температуры	Термометр медицинский RELSIB WT50	<a href="https://relsib.com/product/termometr-meditsinskij-tsifrovoj-elektronnyj-relsib-wt50">https://relsib.com/product/termometr-meditsinskij-tsifrovoj-elektronnyj-relsib-wt50</a>
Канал измерения показателей гемодинамики	Пульсоксиметр MD300W запястный	<a href="https://choicemed.ru/catalog/pulsoksimetry/271/">https://choicemed.ru/catalog/pulsoksimetry/271/</a>
Канал измерения частоты дыхательных движений	Импедансный измеритель частоты дыхательных движений	[8]
Канал измерения артериального давления	Суточный монитор артериального давления «Валента»	<a href="http://valenta.spb.ru/card.html?monitor_ad#/neighborhood1">http://valenta.spb.ru/card.html?monitor_ad#/neighborhood1</a>
Канал мониторинга электрической активности сердца	Монитор электрической активности сердца «Portable Cardioanalyzer»	[7]
Канал измерения гликемии	Монитор уровня глюкозы Abbott FreeStyle Libre	<a href="https://www.abbott.com">https://www.abbott.com</a>

Размещение измерительных каналов на теле больного представлено на рис. 3.

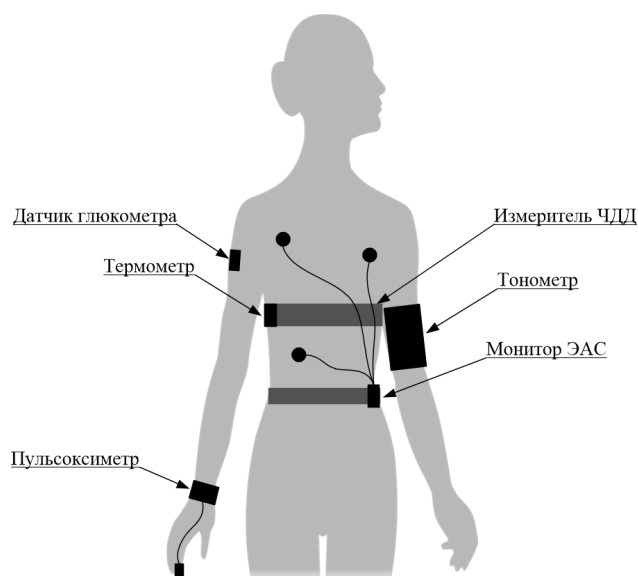


Рис. 3. Размещение измерительных каналов на теле больного

Для мониторинга ЧДД предпочтителен импедансный метод измерения. При измерении ЧДД импедансным методом канал состоит из первичного измерительного преобразователя (ПИП) импеданса  $Z_x$ , вторичного измерительного преобразователя (ВИП), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и блока обработки измерительной информации (БОИИ). Датчик импеданса представляет собой плоский конденсатор, обе обкладки которого закрепляются на эластичном поясе на груди (рис. 3). Циклическое движение грудной клетки при дыхании вызывает циклическое изменение электрического импеданса датчика из-за изменений относительного положения обкладок конденсатора и относительной диэлектрической проницаемости грудной клетки.

В качестве ВИП целесообразно использовать преобразователь «модуль импеданса – напряжение постоянного тока» [8], структурная схема которого представлена на рис. 4.

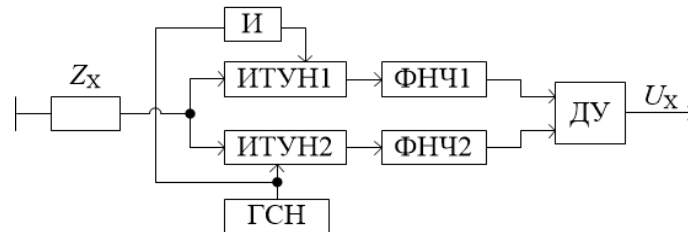


Рис. 4. Структурная схема ВИП

ВИП состоит из генератора синусоидального напряжения ГСН, инвертора И, управляемых напряжением источников тока ИТУН1 и ИТУН2, фильтров низких частот ФНЧ1 и ФНЧ2, дифференциального усилителя ДУ. Наличие в схеме двух ИТУН обеспечивает в отличие от аналогов гармоническое напряжение на датчике и позволяет формировать выходное напряжение в течение обоих полупериодов синусоидального напряжения, чем достигается предельная для данного класса преобразователей чувствительность.

Для реализации канала измерения частоты дыхания можно использовать любой микро-мощный АЦП, имеющий 8–12 двоичных разрядов и частоту преобразования 0,5–1,0 кГц.

При заболевании COVID-19 у всех пациентов с сахарным диабетом наступает декомпенсация углеводного обмена, что требует непрерывного наблюдения за уровнем глюкозы крови для коррекции сахароснижающей терапии. Осуществить такой мониторинг позволяет монитор уровня глюкозы (см. табл. 3) Abbott FreeStyle Libre 3 компании Abbott Diabetes Care Ltd. Основой системы является одноразовый электрохимический датчик, конструктивно совмещенный с АЦП и беспроводным интерфейсом. Датчик вживляется под кожу и непрерывно функционирует в течение 14 дней. Измерения уровня глюкозы в межклеточной жидкости, зависящего от уровня глюкозы в крови, бесконтактно считываются специальным сканером. Сканер показывает не только значение в реальном времени, но и общее направление изменения уровня глюкозы на основании данных, фиксируемых каждые 15 мин в течение предшествующих 8 ч.

Канал мониторинга ЭАС может быть реализован на основе монитора ЭАС «Portable Cardioanalyzer», разработанного на кафедре «Информационно-измерительная техника и метрология» Пензенского государственного университета [7]. Мониторинг ЭАС осуществляется путем съема и регистрации электрокардиосигнала (ЭКС) в условиях свободной двигательной активности больного и передачи его лечащему врачу. Монитор ЭАС «Portable Cardioanalyzer» обладает следующими техническими характеристиками: 3 канала; частота дискретизации 500 Гц; однополярное питание 3,7 В. Габаритные размеры прибора: 100×50×30 мм. Масса прибора: не более 0,2 кг. Портативный кардиоанализатор выполняет следующие функции: регистрация ЭКС; запись ЭКС в файл; предварительная обработка ЭКС; анализ ЭКС; передача ЭКС по протоколу Bluetooth Low Energy.

Подсистема обработки измерительной информации в соответствии с работой [6] обеспечивает формирование экстренных сообщений в следующих случаях:

- 1) температура тела больного  $\geq 38,5$  °С в течение 3 дней;
- 2) выполняются два из следующих критериев:  $SpO_2 < 95$  %;  $t \geq 38$  °С; ЧДД  $> 22$  мин<sup>-1</sup>;
- 3) САД  $< 90$  мм рт.ст. и (или) ДАД  $< 60$  мм рт.ст.;
- 4) затрудненное дыхание, нарушение ритма дыхания,  $SpO_2 < 93$  %.

### Заключение

Включение в состав существующих телемедицинских информационно-коммуникационных систем автоматической информационно-измерительной системы для мониторинга (дистанционного наблюдения) состояния больного открывает возможность лечения больных COVID-19 на дому в полном соответствии с последними руководящими документами Минздрава РФ и Временными методическими рекомендациями по профилактике, диагностике и лечению новой коронавирусной инфекции COVID-19. В состав ИИС входят основные (измерения температуры тела, показателей гемодинамики и дыхания) и дополнительные (измерения систолического и диастолического артериального давления, гликемии и показателей ЭАС) измерительные каналы. Основные каналы применяются для лечения COVID-19, дополнительные – при наличии у больного COVID-19 хронических заболеваний. Представлен возможный вариант реализации ИИС на основе имеющихся на рынке отечественных средств измерений.

### Список литературы

1. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам применения информационных технологий в сфере охраны здоровья : федер. закон № 242-ФЗ от 29.07.2017 : принят Государственной Думой 21 июля 2017 г. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_221184](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221184)
2. Телемедицинская информационная система Минздрава РФ. URL: <http://tmk.rosminzdrav.ru>
3. ООО «ДокДок Территория Здоровья», сервис «СберЗдоровье». URL: <https://sberhealth.ru>
4. О внесении изменений в приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации № 198н от 19 марта 2020 г. «О временном порядке организации работы медицинских организаций в целях реализации мер по профилактике и снижению рисков распространения новой коронавирусной инфекции COVID-19» : приказ Министерства здравоохранения РФ № 1184н от 30 октября 2020 г. URL: <https://www.garant.ru/hotlaw/federal/1421528>
5. ГОСТ Р 57757-2017. Дистанционная оценка параметров функций, жизненно важных для жизнедеятельности человека. Общие требования. М., 2017. 11 с.
6. Временные методические рекомендации по профилактике, диагностике и лечению новой коронавирусной инфекции COVID-19 (Версия 9, 26.10.2020).
7. Bodin O. N., Safronov M. I., Ozhikenov K. A. [et al.]. Portable cardioanalyzer // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Erlagol, 2017. P. 605–609. doi: 10.1109/EDM.2017.7981826
8. Патент 1711094 МКИ G 01 R27/26 Преобразователь емкости датчика / А. Б. Андреев, В. А. Баранов, Вл. А. Баранов. Заявл. 21.11.1989 ; опубл. 07.02.1992, Бюл. № 5.

### References

1. *O vnesenii izmeneniy v ot del'nye zakonodatel'nye akty Rossiyskoy Federatsii po voprosam primeneniya informatsionnykh tekhnologiy v sfere okhrany zdorov'ya: feder. zakon № 242-FZ ot 29.07.2017: prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 21 iyulya 2017 g.* = *On amendments to certain legislative acts of the Russian Federation on the application of information technologies in the field of health protection: feder. Law No. 242-FZ of 29.07.2017: adopted by the State Duma on July 21, 2017.* Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_221184](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221184) (In Russ.)
2. *Telemeditsinskaya informatsionnaya sistema Minzdrava RF* = *Telemedicine Information System of the Ministry of Health of the Russian Federation.* Available at: <http://tmk.rosminzdrav.ru> (In Russ.)
3. *ООО «DokDok Territoriya Zdorov'ya», servis «SberZdorov'e»* = *LLC "DokDok Territory of Health", service "Sberbank Health".* Available at: <https://sberhealth.ru> (In Russ.)
4. *O vnesenii izmeneniy v prikaz Ministerstva zdavookhraneniya Rossiyskoy Federatsii № 198n ot 19 marta 2020 g. «O vremennom poryadke organizatsii raboty meditsinskikh organizatsiy v tselyakh realizatsii mer po profilaktike i snizheniyu riskov rasprostraneniya novoy koronavirusnoy infektsii COVID-19»: prikaz Ministerstva zdavookhraneniya RF № 1184n ot 30 oktyabrya 2020 g.* = *On amendments to the Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 198n of March 19, 2020 "On the Temporary Procedure for organizing the work of medical organizations in order to implement measures to prevent and reduce the risks of spreading the new coronavirus infection COVID-19": Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 1184n of October 30, 2020.* Available at: <https://www.garant.ru/hotlaw/federal/1421528> (In Russ.)
5. *GOST R 57757-2017. Distantcionnaya otsenka parametrov funktsiy, zhiznenno vazhnykh dlya zhiznedeyatel'nosti cheloveka. Obshchie trebovaniya* = *Remote assessment of the parameters of functions that are vital for human life. General requirements.* Moscow, 2017:11. (In Russ.)

6. *Vremennye metodicheskie rekomendatsii po profilaktike, diagnostike i lecheniyu novoy koronavirusnoy infektsii COVID-19 (Versiya 9, 26.10.2020)* = Interim guidelines for the prevention, diagnosis and treatment of new coronavirus infection CAVID-19 (Version 9, 26.10.2020). (In Russ.)
7. Bodin O.N., Safronov M.I., Ozhikenov K. A. [et al.]. Portable cardioanalyzer. 18th *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Erlagol, 2017:605–609. doi: 10.1109/EDM.2017.7981826
8. Patent 1711094 МКІ G 01 R27/26 *Preobrazovatel' emkosti datchika* = *Sensor capacity converter*. A. B. Andreev, V. A. Baranov, Vl. A. Baranov. Appl. 21.11.1989; publ. 07.02.1992, bull. no. 5. (In Russ.)

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

**Виктор Алексеевич Баранов**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры информационно-измерительной  
техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: baranov\_va2202@mail.ru

**Viktor A. Baranov**

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

**Максим Игоревич Сафонов**

аспирант,  
инженер кафедры информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: safronov.maxim@inbox.ru

**Maksim I. Safronov**

Postgraduate student,  
engineer of sub-department of information  
and measuring equipment and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Ольга Алексеевна Тимохина**

магистрант,  
лаборант-исследователь кафедры информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: timokhina.olga.14.12@mail.ru

**Ol'ga A. Timokhina**

Master degree student,  
research assistant of sub-department of information  
and measuring equipment and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)