

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Козырев Г. И., Усиков В. Д.

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ОБРАТНОГО ОПЕРАТОРА
СТАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРНО-ИЗБЫТОЧНОЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

5

Лавров Р. О., Ольховский А. Н., Кувыкин Ю. А.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ГРУППОВОЙ
ОЦЕНКИ ПРИ КОНТРОЛЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

13

Трофимов А. А., Полина М. А., Гладков А. В.,

Токарев Д. В., Попченкова Т. Н., Здобнов С. А.

АНАЛИЗ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ
ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ
ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

24

Селифанов В. А., Ляшенко А. В., Мартыненко В. В., Фролов М. А.

ПРОБЛЕМАТИКА ЭФФЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ
СОБЫТИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

32

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Голубков П. Е., Печерская Е. А., Карпанин О. В.,

Вареник Ю. А., Александров В. С., Козлов Г. В.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ
ИМПЕДАНСА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ
В ПРОЦЕССЕ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

41

*Голубков П. Е., Печерская Е. А., Мельников О. А.,
Карпанин О. В., Александров В. С., Вареник Ю. А.*
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИМПЕДАНСА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ
ЯЧЕЙКИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ 51

Зыков Е. В., Чайковский В. М.
УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ «ХОЛОДНОЙ» ПЛАЗМЫ 60

*Волчихин В. И., Иванов А. И., Малыгина Е. А.,
Качалин С. В., Полковникова С. А.*
ТЕСТИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОРРЕКЦИИ
ОШИБОК ВЫЧИСЛЕНИЯ СТАНДАРТНОГО ОТКЛОНЕНИЯ
МАЛЫХ ВЫБОРОК БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ 67

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Назарычев А. П., Тычков А. Ю., Комкова Ю. Н., Сугрובה Г. А.
АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ
ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ У ДЕТЕЙ
С ДЕФИЦИТОМ РАЗВИТИЯ 73

*Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Бофанова Н. С.,
Алимурадов А. К., Овчинников Д. Л., Сотников А. М.*
ПРИМЕНЕНИЕ VR ДЛЯ КОНТРОЛЯ И КОРРЕКЦИИ
ФОБИЧЕСКИХ ТРЕВОЖНЫХ РАССТРОЙСТВ 84

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 4, 2021

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Kozyrev G.I., Usikov V.D.

FEATURES OF SYNTHESIS OF REVERSE OPERATOR OF STATIC
STRUCTURALLY REDUNDANT MEASURING SYSTEM

5

Lavrov R.O., Ol'khovskiy A.N., Kuvykin Yu.A.

APPLICATION OF THE METHODOLOGY OF GROUP
EVALUATION IN CONTROL OF METROLOGICAL
CHARACTERISTICS OF VIBROACOUSTIC CHANNELS
OF MEASURING COMPLEXES AND SYSTEMS

13

Trofimov A.A., Polina M.A., Gladkov A.V.,

Tokarev D.V., Popchenkova T.N., Zdobnov S.A.

ANALYSIS AND SYSTEMATIZATION OF MAJOR TYPES
PHOTOELECTRONIC CONVERTERS USED IN CONSTRUCTION
OF INFORMATION-MEASURING OBJECT POSITION SYSTEMS

24

Selifanov V.A., Lyashenko A.V., Martynenko V.V., Frolov M.A.

PROBLEMS OF EFFECTIVE ASSESSMENT OF INFORMATION
SECURITY EVENTS IN THE ROCKET AND SPACE INDUSTRY

32

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Karpanin O.V.,

Varenik Yu.A., Aleksandrov V.S., Kozlov G.V.

METROLOGICAL ANALYSIS OF THE CHANNEL
FOR MEASURING THE IMPEDANCE OF A GALVANIC CELL
IN THE PROCESS MICRO-ARC OXIDATION

41

*Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Mel'nikov O.A.,
Karpanin O.V., Aleksandrov V.S., Varenik Yu.A.*
METROLOGICAL TESTS OF A MICRO-ARC
OXIDATION GALVANIC CELL IMPEDANCE 51

Zykov E.V., Chaykovskiy V.M.
DEVICE FOR FORMING «COLD» PLASMA 60

*Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Malygina E.A.,
Kachalin S.V., Polkovnikova S.A.*
TESTING THE QUALITY OF NEURAL NETWORK ERROR
CORRECTION FOR CALCULATING THE STANDARD
DEVIATION OF SMALL SAMPLES OF BIOMETRIC DATA 67

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Nazarychev A.P., Tychkov A.Yu., Komkova Yu.N., Sugrobova G.A.
ADAPTIVE PROCESSING AND ANALYSIS OF
ELECTROCARDIOSIGNALS IN CHILDREN
WITH A DEFICIT OF DEVELOPMENT 73

*Tychkov A.Yu., Chernyshov D.S., Bofanova N.S.,
Alimuradov A.K., Ovchinnikov D.L., Sotnikov A.M.*
VR IMPLEMENTATION FOR CONTROL
AND CORRECT PHOBIC ANXIETY DISORDERS 84

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.586

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

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ОБРАТНОГО ОПЕРАТОРА СТАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРНО-ИЗБЫТОЧНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Г. И. Козырев¹, В. Д. Усиков²

^{1,2} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

^{1,2} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы работы обусловлена необходимостью нахождения точной оценки обратной функции преобразования адаптивных и интеллектуальных средств измерений в процессе их калибровки и проведения измерений. Целью работы является рассмотрение особенностей синтеза обратного оператора статической структурно-избыточной измерительной системы (СИИС) при проведении предварительных метрологических испытаний (МИ) СИИС с заданной точностью при воздействии на измерительную систему различного рода дестабилизирующих факторов. *Материалы и методы.* Рассмотрены необходимые и достаточные условия синтеза обратного оператора статической СИИС в явном виде. *Результаты.* Показано, что синтез обратного оператора статической СИИС с заданной точностью в процессе предварительных МИ является квазиоптимальной процедурой по сравнению с синтезом прямого оператора из-за неопределенности и «нестандартности» области его определения. Предложена квазиоптимальная процедура идентификации обратного оператора СИИС, позволяющая с помощью предварительного расчета введенного коэффициента квазиоптимальности для конкретного типа измерительных систем (ИС) решить задачу минимизации затрат на МИ при построении обратного оператора статической СИИС с заданной точностью и в полной мере использовать методы теории оптимального эксперимента. *Выводы.* Учет квазиоптимальности процедуры синтеза обратного оператора СИИС с помощью введенного коэффициента позволяет для конкретного типа ИС выбрать достаточно эффективную процедуру идентификации в смысле минимизации максимальной или средней дисперсии оценки измеряемой величины (критериев G - или Q -оптимальности), а также планировать МИ в «стандартной» области в виде n -мерного гиперкуба.

Ключевые слова: обратный оператор, структурная избыточность, инвариантность, дестабилизирующие факторы, квазиоптимальность

Для цитирования: Козырев Г. И., Усиков В. Д. Особенности синтеза обратного оператора статической структурно-избыточной измерительной системы // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 5–12. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-1

FEATURES OF SYNTHESIS OF REVERSE OPERATOR OF STATIC STRUCTURALLY REDUNDANT MEASURING SYSTEM

G.I. Kozyrev¹, V.D. Usikov²

^{1,2} Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

^{1,2} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic of work is due to the need to find an accurate assessment of the inverse function of converting adaptive and intelligent measuring instruments during their calibration and measurement. The purpose of the work is to consider the characteristics of the synthesis of the reverse operator of the static structural excess measuring system when conducting preliminary metrological tests with a given accuracy when exposing the measuring system to various kinds of destabilizing factors. *Materials and methods.* The necessary and sufficient conditions of synthesis of the inverse operator of the static structure-redundant measuring system in explicit form are considered. *Results.* It is shown that the synthesis of the inverse operator of the static structure-redundant measuring system with a given accuracy in the process of preliminary metrological tests is a quasi-optimal procedure compared to the synthesis of the direct operator due to uncertainty and «non-standard» area of its definition. A quasi-optimal procedure for identifying the inverse operator of a structurally redundant measurement system is proposed, which allows, using a preliminary calculation of the introduced quasi-optimal coefficient for a particular type of measurement system, to solve the problem of minimizing the costs of metrological tests when constructing the inverse operator of a static structurally redundant measurement system with a given accuracy and fully use methods of optimal experiment theory. *Conclusions.* Taking into account the quasi-optimality of the procedure for synthesizing the inverse operator of a structurally redundant measuring system using the introduced coefficient allows for a specific type of measuring system to choose a sufficiently effective identification procedure in the sense of minimizing the maximum or average variance of the estimate of the measured value (G - or Q -optimality criteria), as well as to plan metrological tests in the «standard» area in the form of an n -dimensional hypercube.

Keywords: inverse operator, structural redundancy, invariance, destabilizing factors, quasi-optimality

For citation: Kozyrev G.I., Usikov V.D. Features of synthesis of reverse operator of static structurally redundant measuring system. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-1

Введение

Как показывает практика, одними из основных факторов, затрудняющих принятие достоверных диагностических решений и, следовательно, выработку управляющих воздействий, являются систематические погрешности измерительных трактов, имеющие, как правило, спектр более низкий, нежели спектр входного сигнала, или совпадающий с ним.

Одной из важнейших причин возникновения систематических погрешностей измерительных трактов является влияние различного рода дестабилизирующих факторов (ДФ), которые в наибольшей степени воздействуют на первичные элементы измерительной системы (ИС) – измерительные преобразователи или датчики. Влияние ДФ приводит со временем к появлению скрытых (метрологических) отказов, проявляющихся в постепенном ухудшении точностных характеристик ИС выходящих в ряде случаев за пределы допустимых значений. Это, в свою очередь, влечет за собой получение неправильных результатов измерений и в зависимости от места применения ИС, может привести к непредсказуемым последствиям.

Известны два пути обеспечения требуемых точностных характеристик ИС при воздействии на них в процессе эксплуатации различного рода ДФ [1]:

1) конструктивно-технологический, связанный с применением более стабильных материалов, совершенствованием конструкций и технологий изготовления, экранированием, термостатированием и т.п.;

2) структурный, основанный на совершенствовании структуры ИС.

В структурных схемах ИС при более глубоком рассмотрении можно установить наличие двух и более каналов (пространственных или временных) передачи возмущений или ДФ в ИС. Наличие дополнительных каналов в ИС для компенсации ДФ позволяет подойти к их синтезу и анализу с позиций теории инвариантности, развитой применительно к системам автоматического управления и регулирования. Критерий абсолютной инвариантности ИС относительно действующего на нее ДФ можно сформулировать следующим образом: необходимым (но не достаточным) условием реализации абсолютно инвариантной системы является наличие в схеме ИС по меньшей мере двух каналов передачи возмущающего воздействия между точкой его приложения и точкой, относительно которой достигается инвариантность, – принцип многоканальности или принцип двухканальности Б. Н. Петрова [2]. Достаточные же условия физической реализуемости связаны с фактической выполнимостью требований абсолютной инвариантности с помощью устройств, состоящих только из физически реализуемых звеньев.

Процедура получения результата измерения с помощью ИС предполагает проведение двух основных последовательных преобразований: прямого $F : x(t) \rightarrow y(t)$, в ходе которого система F отображает входной сигнал $x(t)$ в промежуточный результат $y(t)$, и обратного $G : y(t) \rightarrow \hat{x}(t)$, называемого восстановлением сигнала.

Преобразование F носит физический характер G , как правило, чисто вычислительный.

Очевидно, что как при проведении измерений в процессе эксплуатации ИС, так и в процессе калибровки ИС основной проблемой является как можно более точное определение обратного оператора ИС [3] с учетом воздействия совокупности ДФ.

Задачей данной статьи является рассмотрение особенностей синтеза обратного оператора статической структурно-избыточной ИС (СИИС) при проведении предварительных метрологических испытаний (МИ) СИИС и дальнейшего процесса измерений с заданной точностью при воздействии на ИС различного рода ДФ.

Предварительные замечания

Согласно принципу многоканальности для синтеза ИС, инвариантной относительно $(n - 1)$ ДФ, необходимо создание не менее $(n - 1)$ дополнительных каналов их передачи в рамках единой структуры ИС. В этом случае прямой оператор, описывающий статическую структурно-избыточную ИС, можно представить в виде

$$Y_{<n>} = F_{<n>}(X_{<n>}), \quad (1)$$

где $Y_{<n>}^T = \langle y_1, \dots, y_n \rangle$ – n -мерный вектор выходных сигналов СИИС; $F_{<n>}^T = \langle f_1, \dots, f_n \rangle$ – n -мерный вектор нелинейных в общем случае функций, описывающих отдельные измерительные каналы СИИС; $X_{<n>}^T = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$ – n -мерный вектор входных воздействий, причем x_1 представляет собой измеряемое воздействие, x_2, \dots, x_n – возмущения или ДФ; T – знак транспонирования.

Как показано в работе [2], необходимым условием для достижения абсолютной инвариантности ИС относительно $(n - 1)$ ДФ является неравенство нулю функционального определителя системы (1)

$$\frac{\partial(y_1, \dots, y_n)}{\partial(x_1, \dots, x_n)} \neq 0. \quad (2)$$

Выражение (2) требует наличия асимметрии в измерительных каналах СИИС.

Достаточные же условия физической реализуемости связаны с фактической выполнимостью требований инвариантности с помощью устройств, состоящих только из физически реализуемых звеньев. Для статических ИС указанные требования заключаются лишь в возможности реализации того или иного функционального преобразования $f_i(X_{<n>})$.

Потребителя, который имеет в своем распоряжении только вектор выходных измеряемых величин $Y_{<n>}$, в конечном итоге интересуется оценка вектора входных воздействий во всей области изменения вектора выхода $Y \in \Omega_y$, т.е. обратный оператор СИИС

$$X_{<n>} = G_{<n>}(Y_{<n>}), \quad (3)$$

где $G_{<n>}^T = \langle g_1, \dots, g_n \rangle$ – n -мерный вектор нелинейных в общем случае функций либо

$$x_1 = g_1(y_1, \dots, y_2), \quad (4)$$

если требуется информация только об основном измеряемом воздействии.

Получить выражения (3) или (4) в явном виде для оценки входных воздействий, если прямой оператор СИИС (1) представляет собой систему нелинейных уравнений, в общем случае не удастся, так как не существует прямых методов решения систем нелинейных уравнений и применяются итерационные методы с известной проблемой начального приближения и громоздкостью вычислений [4]. Поэтому построение обратного оператора СИИС в области Ω_y

для частных случаев системы (1), если выражения (3) или (4) представляют собой простые зависимости, например в виде полиномов, позволяют резко сократить вычислительные затраты по получению оценок входных воздействий с заданной точностью, но при этом накладывают специфические особенности:

- а) на синтез многоканальных измерителей;
- б) на методику проведения МИ СИИС и алгоритм обработки экспериментальных данных в процессе идентификации СИИС.

Рассмотрим эти особенности подробнее.

Условия синтеза обратного оператора статической СИИС в явном виде

Для того, чтобы построить обратный оператор СИИС в явном виде, необходимо, чтобы ее прямой оператор F представлял собой биекцию, т.е. являлся взаимно-однозначным отображением $F: X \rightarrow Y$ [5].

Применительно к выражению (1) это означает, что синтез СИИС должен производиться таким образом, чтобы система нелинейных уравнений, с помощью которой описывается ее прямой оператор F , имела только одно решение во всей области изменения вектора входных переменных $X \in \Omega_X$.

Первым необходимым условием при этом является неравенство (2).

Вторым условием осуществления построения обратного оператора СИИС в явном виде является отсутствие более одного решения системы (1) в области Ω_X . Учитывая, что функции преобразования реальных статических ИС хорошо описываются плавными дифференцируемыми функциями, для проверки биективности оператора F в области Ω_X с вычислительной точки зрения удобно воспользоваться условиями единственности решения системы нелинейных уравнений (1) методом Ньютона или итераций [6].

Для повышения точности оценки вектора входных переменных X необходимо стремиться к максимуму якобиана системы (1) в точке ее решения X^* . С геометрической точки зрения это означает, что угол пересечения эквипотенциальных кривых $y_i = \text{const}$, ($i = \overline{1, n}$) в точке $X^* \in \Omega_X$ должен быть близок к 90° . Для двухканальной СИИС подобный случай изображен на рис. 1, где $\Omega_X = [x_{1\min} \div x_{1\max}; x_{2\min} \div x_{2\max}]$.

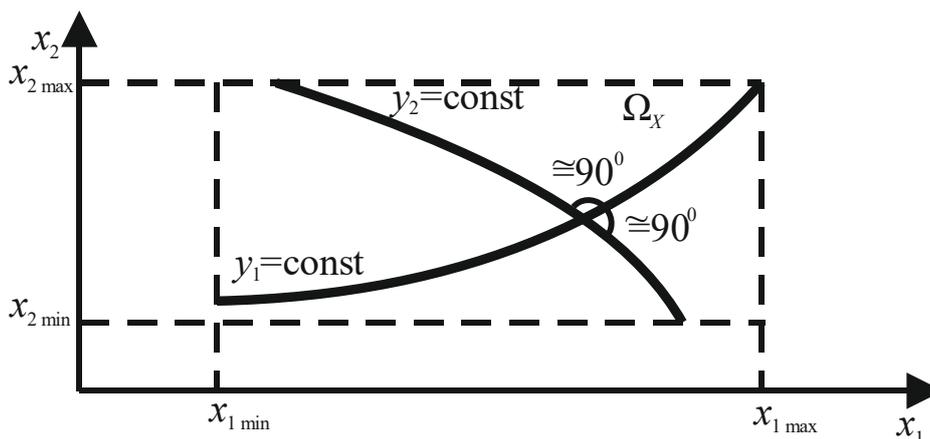


Рис. 1. Эквипотенциальные кривые выходных сигналов СИИС с максимальной асимметрией измерительных каналов

Если в процессе синтеза СИИС не удалось достигнуть биективности оператора F во всей области Ω_X , то целесообразно выделить подобласти $\Omega_{X'} \subset \Omega_X$, где сохраняется взаимно-однозначность и возможно построение обратного оператора, либо просто сузить область определения F (рис. 2).

Здесь $\Omega_{X'} = [x_{1\min} \div x_{1\max}; x_{2\min} \div x_{2\max}']$.

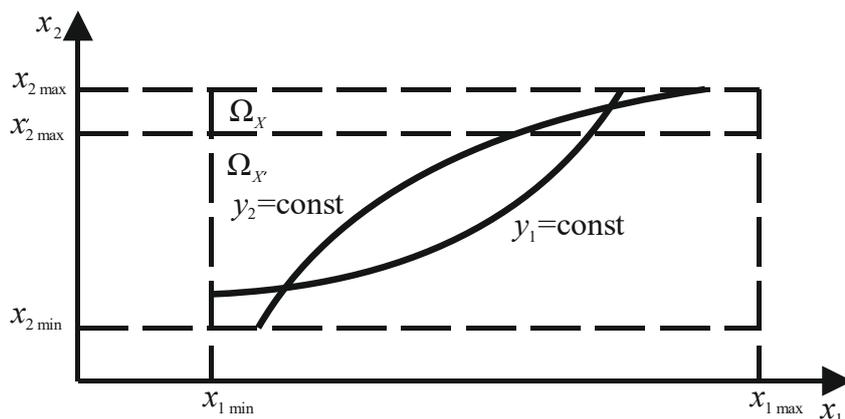


Рис. 2. Сужение области определения прямого оператора СИИС для достижения однозначного решения

Особенности проведения МИ и обработки экспериментальных данных при идентификации СИИС с заданной точностью

Отличительным признаком оценивания прямого F и обратного G операторов СИИС в процессе идентификации являются различия в области их определения.

Областью определения прямого оператора СИИС является пространство Ω_X вектора входных независимых переменных X , которое известно или задано и обычно представляется при нормированных x_i в виде n -мерного гиперкуба $-1 \leq x_{in} \leq 1$, где

$$x_{in} = \frac{x_i - (x_{i\max} + x_{i\min}) / 2}{(x_{i\max} - x_{i\min}) / 2}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

С точки зрения теории планирования эксперимента пространство Ω_X является стандартным, для которого разработаны эффективные процедуры активной идентификации [7].

Обратный же оператор G ИС определен в пространстве Ω_Y выходных зависимых величин Y , которое зачастую априори неизвестно и не может выступать в качестве области планирования МИ. К тому же из-за нелинейности прямого оператора F пространство Ω_X является «нестандартным», т.е. его нельзя представить в виде n -мерного гиперкуба.

Указанные обстоятельства значительно затрудняют процесс нахождения обратного оператора ИС. В общем случае построить инверсную модель ИС оптимальным образом в смысле минимизации затрат при заданной точности или максимизации точности идентификации при заданных затратах даже при известном виде оператора G , но неизвестной области его определения невозможно. Поэтому в дальнейшем речь пойдет о квазиоптимальной процедуре проведения МИ в процессе синтеза обратного оператора СИИС.

Учитывая малую нелинейность оператора F для реальных ИС, процесс МИ планируется оптимальным образом в смысле выбранного критерия в пространстве Ω_X для обратного оператора заданной сложности. Результаты МИ при нахождении оценки обратного оператора G , определенного на Ω_Y , обрабатываются с помощью известных методов, применяемых при пассивном эксперименте [8]. Оценка обратного оператора является в этом случае приближением в метрике L_2 n -мерного пространства Ω_Y к экспериментальным данным, полученным в процессе МИ. Замена априорно неизвестной «нестандартной» области Ω_Y планирования МИ на стандартную область Ω_X при нахождении инверсной модели СИИС отражает квазиоптимальность предложенной процедуры, что можно выразить через коэффициент квазиоптимальности K .

Представим обратный оператор $G_{<n>}$ СИИС в параметрическом виде

$$X_{<n>} = G_{<n>}(Y_{<n>}) = B_{[n,p]}^T R_{<p>}(Y_{<n>}), \quad (6)$$

где $B_{[n,p]}^T$ – транспонированная матрица оцениваемых параметров, соответствующая n измерительным каналам СИИС; $R_{<p>}(Y_{<n>})$ – вектор известных базисных функций, которые с уче-

том плавности и монотонности статических характеристик СИИС имеют, как правило, полиномиальный вид.

Тогда при оценивании матрицы $B_{[n,p]}$ по методу наименьших квадратов (МНК) дисперсия оценки воздействия x по модели (6) будет равна [9]

$$\sigma_x^2(Y) = \frac{1}{K(Y)} R^T(Y) U(B) R(Y), \quad (7)$$

где $U(B)$ – дисперсионно-ковариационная матрица МНК – оценок вектора-столбца $B_{[p,1]} = B_{[p]}$ для полезного воздействия $x = x_1$; $K(Y) \leq 1$ – коэффициент квазиоптимальности, который рассчитывается для конкретного типа ИС по результатам МИ одной или нескольких ИС данного типа.

Как видно из формулы (7), величина $\sigma_x^2(Y)$ зависит от значений вектора $Y_{<n>}$. Для того, чтобы избежать подобного влияния, в качестве показателей точности инверсной модели ИС выберем максимальную $\sigma_{x^{\max}}^2$ или среднюю $\sigma_{x^{\text{cp}}}^2$ дисперсии оценки величины x по модели (6):

$$\sigma_{x^{\max}}^2 = \max \sigma_x^2(Y) = (1 / K_{\max}) \sigma_{y^{\max}}^2, \quad (8)$$

$$\sigma_{x^{\text{cp}}}^2 = \frac{1}{V_{\Omega_y}} \int_{\Omega_y} \sigma_x^2(Y) dY = (1 / K_{\text{cp}}) \sigma_{y^{\text{cp}}}^2, \quad (9)$$

где $\sigma_{x^{\max}}^2$, $\sigma_{x^{\text{cp}}}^2$ – максимальная и средняя дисперсии оценки величины x по модели (6) при условии использования «стандартной» области планирования эксперимента; $\sigma_{y^{\max}}^2$, $\sigma_{y^{\text{cp}}}^2$ – максимальная и средняя дисперсии оценки величины $y = y_1$ в рамках модели $y_1 = f_1(x_1, \dots, x_n)$ для основного измерительного канала; V_{Ω_y} – объем области Ω_y .

Таким образом, учет квазиоптимальности процедуры синтеза обратного оператора СИИС с помощью коэффициентов K_{\max} и K_{cp} позволяет для конкретного типа ИС выбрать наиболее эффективную процедуру идентификации в смысле минимизации выражений (8) или (9) (критериев G - или Q -оптимальности), а также планировать МИ в «стандартной» области Ω_x .

Так как в пределах конкретного типа ИС коэффициенты квазиоптимальности K_{\max} или K_{cp} есть величины примерно постоянные (учитывая единую технологию ИС), то предварительный их расчет позволяет для решения задачи минимизации затрат на МИ при построении обратного оператора СИИС с заданной точностью в полной мере использовать методы теории оптимального эксперимента.

В процессе исследований были проведены МИ модифицированных (с асимметричными каналами) двухканальных тензометрических датчиков давления типа Вт-232 в диапазоне измеряемых давлений $0 \div 2$ МПа и рабочих температур $-60 \div 90^\circ\text{C}$. По результатам МИ с помощью ЭВМ был произведен расчет коэффициентов квазиоптимальности K_{\max} или K_{cp} . Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов квазиоптимальности

Номер датчика	003	030	027	948 (с питанием от ист. тока)	948 (с питанием от ист. напряжения)
K_{\max}	0,688	0,723	0,721	0,944	0,874
K_{cp}	0,654	0,676	0,663	0,774	0,722

Как видно из табл. 1, «нестандартность» области Ω_y по причине зависимости вектора предикторных переменных Y снижает точность оценки измеряемой величины x по сравнению с оптимальной процедурой идентификации при независимых компонентах вектора предик-

торных переменных и известной «стандартной» области их определения. Указанное обстоятельство обязательно следует учитывать на этапе проведения предварительных МИ в условиях синтеза обратного оператора СИИС с наперед заданной точностью.

Заключение

Планирование МИ при нахождении обратного оператора статической СИИС является квазиоптимальной процедурой из-за неопределенности и «нестандартности» области определения Ω_y обратного оператора. Учет квазиоптимальности процедуры синтеза обратного оператора СИИС позволяет для конкретного типа ИС выбрать наиболее эффективную процедуру идентификации в смысле G - или Q -критериев, а также планировать МИ в «стандартной» области в виде n -мерного гиперкуба.

Список литературы

1. Земельман М. А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М. : Издательство стандартов, 1972. 200 с.
2. Петров Б. Н., Викторов В. А., Лукин Б. В. Принцип инвариантности в измерительной технике. М. : Наука, 1976. 244 с.
3. Ларионов В. А. Методы аппроксимации обратных функций преобразования интеллектуальных датчиков // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 6–11.
4. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем со многими неизвестными. М. : Мир, 1975. 558 с.
5. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. М. : Высш. шк., 2003. 384 с.
6. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В. Вычислительные методы. СПб. : Лань, 2014. 672 с.
7. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / под ред. В. В. Налимова. М. : Metallurgiya, 1982. 751 с.
8. Себер Д. Линейный регрессионный анализ. М. : Мир, 1980. 456 с.
9. Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н. Методы планирования эксперимента и обработки данных : учеб. пособие. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 131 с.

References

1. Zemel'man M.A. *Avtomaticheskaya korrektsiya pogreshnostey izmeritel'nykh ustroystv = Automatic correction of measurement device errors*. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1972:200. (In Russ.)
2. Petrov B.N., Viktorov V.A., Lukin B.V. *Printsip invariantnosti v izmeritel'noy tekhnike = The principle of invariance in measuring technology*. Moscow: Nauka, 1976:244. (In Russ.)
3. Larionov V.A. Methods of approximation of inverse transformation functions of intelligent sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2011;(11):6–11. (In Russ.)
4. Ortega Dzh., Reynboldt V. *Iteratsionnye metody resheniya nelineynykh sistem so mnogimi neizvestnymi = .* Moscow: Mir, 1975:558. (In Russ.)
5. Yablonskiy S.V. *Vvedenie v diskretnuyu matematiku = Introduction to discrete mathematics*. Moscow: Vyssh. shk., 2003:384. (In Russ.)
6. Amosov A.A., Dubinskiy Yu.A., Kopchenova N.V. *Vychislitel'nye metody = Computational methods*. Saint Petersburg: Lan', 2014:672. (In Russ.)
7. Nalimov V.V. (ed.). *Tablitsy planov eksperimenta dlya faktornykh i polinomial'nykh modeley = Tables of experimental plans for factorial and polynomial models*. Moscow: Metallurgiya, 1982:751. (In Russ.)
8. Seber D. *Lineynyy regressionnyy analiz = Linear regression analysis*. Moscow: Mir, 1980:456. (In Russ.)
9. Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. *Metody planirovaniya eksperimenta i obrabotki dannykh: ucheb. posobie = Methods of experiment planning and data processing : textbook*. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2016:131. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Геннадий Иванович Козырев

доктор технических наук, профессор,
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: vka@mil.ru

Gennadiy I. Kozyrev

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of telemetric systems, integrated processing
and information protection,
Military Space Academy
named after A. F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Валентин Дмитриевич Усиков

адъюнкт,

Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского

(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)

E-mail: vka@mil.ru

Valentin D. Usikov

Adjunct,

Military Space Academy

named after A. F. Mozhaysky

(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

УДК 621.396.96
doi:10.21685/2307-5538-2021-4-2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ГРУППОВОЙ ОЦЕНКИ ПРИ КОНТРОЛЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

Р. О. Лавров¹, А. Н. Ольховский², Ю. А. Кувькин³

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

^{2,3} Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации, Мытищи, Россия
¹9432923@mail.ru, ²rusregister.ano@mail.ru, ³original.rus@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы работы обусловлена необходимостью контроля метрологических характеристик средств измерений в процессе их эксплуатации. *Материалы и методы.* Рассмотрено применение группы средств измерений в качестве средства контроля метрологических средств измерений путем применения их групповой оценки без использования эталонов для своевременного выявления и замены средств измерений с метрологическим отказом. *Результаты и выводы.* Предложенная в работе методика основана на контроле и учете дрейфа (ухода) погрешностей средств измерений в течение интервала между поверками и оценкой метрологического запаса (запаса метрологической надежности) и анализе статистических данных по уходу погрешности за период эксплуатации средств измерений.

Ключевые слова: групповая оценка, контроль метрологических характеристик, средство измерений, дрейф погрешности, метрологическая надежность, виброакустические величины

Для цитирования: Лавров Р. О., Ольховский А. Н., Кувькин Ю. А. Применение методики групповой оценки при контроле метрологических характеристик виброакустических каналов измерительных комплексов и систем // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 13–23. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-2

APPLICATION OF THE METHODOLOGY OF GROUP EVALUATION IN CONTROL OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF VIBROACOUSTIC CHANNELS OF MEASURING COMPLEXES AND SYSTEMS

R.O. Lavrov¹, A.N. Ol'khovskiy², Yu.A. Kuvykin³

¹ Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

^{2,3} Main Scientific Metrological Center Ministry of Defense of the Russian Federation, Mytishchi, Russia
¹vka@mail.ru, ²rusregister.ano@mail.ru, ³original.rus@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic of the work is due to the need to control the metrological characteristics of measuring instruments during their operation. *Materials and methods.* The use of a group of measuring instruments as a means of monitoring metrological measuring instruments by applying their group assessment without using standards for the timely identification and replacement of measuring instruments with metrological failure is considered. *Results and conclusions.* The method proposed in the work is based on monitoring and accounting for the drift (drift) of the errors of the measuring instruments during the interval between verification and the assessment of the metrological margin (reserve of metrological reliability) and the analysis of statistical data on the drift of the error during the period of operation of the measuring instruments.

Keywords: group assessment, control of metrological characteristics, measuring instrument, error drift, metrological reliability, vibroacoustic values

For citation: Lavrov R.O., Ol'khovskiy A.N., Kuvykin Yu.A. Application of the methodology of group evaluation in control of metrological characteristics of vibroacoustic channels of measuring complexes and systems. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):13–23. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-2

В общем случае задача контроля метрологических характеристик (МХ) средств измерений в процессе их эксплуатации на основе применения групповой оценки сводится к формированию группы однородных по назначению средств измерений (СИ), имеющих в организации (подразделении). Представленная в статье методика контроля основывается на методе групповой оценки. При этом, чтобы обеспечить требуемую точность оценки погрешности СИ методом взаимных сличений, показания приборов сличаются не между собой, а с групповой средней оценкой измеряемых параметров, полученной путем обработки показаний всех приборов. Применение группы СИ в качестве средства контроля МХ возможно, если будет обеспечена погрешность, меньшая погрешности каждого СИ, входящего в группу СИ (групповое СИ), достаточная надежность, небольшие габариты и масса, умеренная стоимость, оперативность применения [1, 2].

Рассмотрим перечисленные показатели, используя общие правила выбора критериев эффективности. В рамках данных исследований, в статье под групповым СИ понимается совокупность средств измерений одного типа, номинального значения или диапазона измерений, применяемых совместно для возможности контроля МХ аналогичных СИ организации в течение интервала между поверками (ИМП) путем взаимных сличений показаний СИ с их групповой оценкой.

Целью создания группового СИ является решение задачи автономного контроля МХ СИ путем применения их групповой оценки без использования эталонов для своевременного выявления и замены СИ с метрологическим отказом, на основе контроля и учета дрейфа (ухода) их погрешности в течение ИМП и оценкой метрологического запаса (запаса метрологической надежности) на основе анализа статистических данных по уходу погрешности за период эксплуатации СИ. Возможность доведения ИМП СИ до назначенного срока службы изделия рассмотрена в работе Мусаева [3].

Поскольку вероятность метрологического отказа при отсутствии в СИ средств встроенного контроля является, как правило, монотонно возрастающей функцией времени, то цель применения предложенной методики – обеспечить выполнение требования по метрологической надежности в конце интервала между поверками без участия сторонних поверочных лабораторий.

Число возможных вариантов состава групповых СИ сравнительно невелико. Например, в специализированных организациях имеется от 4 до 12 СИ виброакустических величин. Поэтому основная задача может быть решена простым перебором вариантов исходя из количества приборов. Как правило, для формирования группового СИ используют не более 3–5 экземпляров СИ, так как дальнейшее увеличение выборки не приводит к существенному увеличению точности групповой оценки [4].

Для группового СИ время, в течение которого можно достоверно хранить и воспроизводить единицу величины, определяется в рамках модели «процесс – допустимая граница» [5]. Данная модель может быть охарактеризована тремя основными параметрами: временем T выхода метрологической характеристики $x(t)$, характеризующей функционирование группового СИ, за пределы допуска; вероятностью $P(t)$ работоспособного состояния группового СИ в заданный момент времени; границами G_d допусков на параметры.

Работоспособность группового СИ обеспечивается поддержанием его характеристик в границах допустимой области. Метрологический отказ – это выход хотя бы одного параметра за эти границы. Состояние $x_0 = x(t_{Gd})$, при котором $x(t)$ находится в области G_d , соответствует работоспособному состоянию группового СИ, при этом условие работоспособности определяется следующим выражением

$$P(t) = P\{x(t) \in G_d, t = [t_0, T]\}, \quad (1)$$

где $x(t)$ – вектор метрологических характеристик группового СИ; $P\{\}$ – вероятность соответствующего события.

Для использования рассмотренной модели надежности типа «процесс – допустимая граница» задаются законом эволюции метрологических характеристик на основе статистических данных по уходу погрешности СИ по результатам их ежегодных поверок [1].

При этом принимается, что погрешности $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_r$ – множество r независимых основных погрешностей СИ, входящих в групповое СИ, распределены по нормальному закону.

Согласно центральной предельной теореме совместное распределение основных погрешностей СИ, входящих в группу СИ $\Delta_i, i = \overline{1, r}$, характеризующее основную погрешность группового СИ λ , также нормально.

В качестве основной погрешности группового СИ принимается определенная функция от погрешностей СИ, формирующих групповую оценку.

На рис. 1 представлена графическая модель эволюции основной погрешности группового СИ.

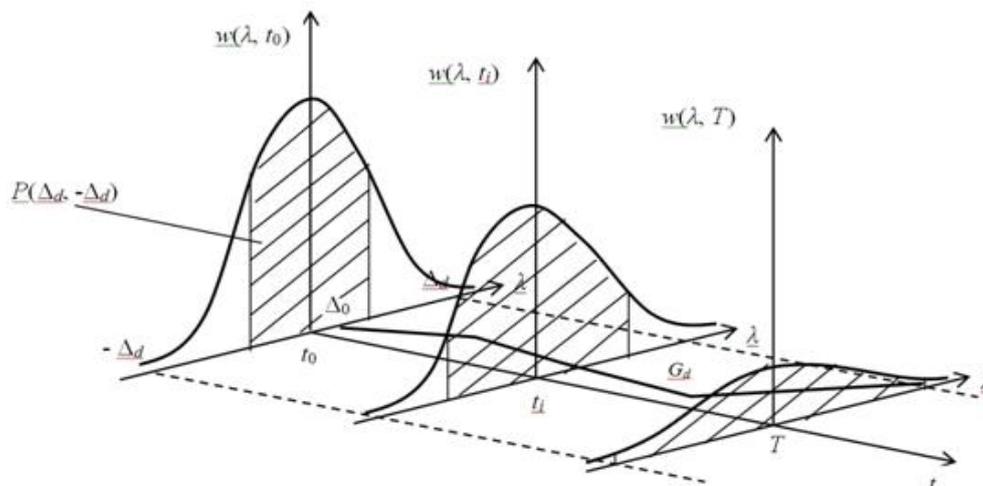


Рис. 1. Графическая модель эволюции основной погрешности группового СИ

В качестве метрологического отказа группового СИ принимается выход его основной погрешности λ за границу допустимых значений $-\Delta_d$ и $+\Delta_d$ области G_d . Тем самым вероятностью безотказной работы группового СИ будет вероятность $U(\lambda, t)$ невыхода процесса эволюции основной погрешности группового СИ $\lambda(t)$ из этой области, т.е.

$$U(\lambda, t_0) \equiv P\{\lambda(t) \in G_d, \forall t \in [t_0, T] | \lambda(t_0) \in G_d\}, G_d \subset [-\Delta_d, \Delta_d], \quad (2)$$

где $U(\lambda, t_0)$ – вероятность того, что ордината λ процесса $\lambda(t)$ ни разу не выйдет за границы допустимой области $G_d \subset [-\Delta_d, \Delta_d]$ на интервале $[t_0, T]$ при условии, что в начальный момент времени $t = t_0$ значение основной погрешности группового СИ $\lambda = \lambda_0$ находилось в допустимой области G_d .

Погрешность группового СИ, формируемая погрешностями измерений одной и той же физической величины несколькими приборами, входящими в групповое СИ, определяется с учетом следующих положений [4].

Принимается, что случайные погрешности приборов малы по сравнению с пределом допускаемых погрешностей, а последние у всех приборов одинаковы и равны Δ . Если показания приборов x_1, \dots, x_n , а действительные их погрешности $\vartheta_1, \dots, \vartheta_n$ ($|\vartheta_i| < \Delta$), то оценка истинного значения измеряемой величины, измеряемой i -м прибором, записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} A &= x_1 - \vartheta_1, \\ &\dots \\ A &= x_n - \vartheta_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Естественной оценкой истинного значения измеряемой величины в случае ее измерения несколькими приборами равной точности является среднее арифметическое их показаний

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (4)$$

Математически доказано, что эта оценка является наилучшей в классе оценок, линейно связанных с показаниями приборов [5, 6]. Для оценки погрешности полученного результата необходимо сложить левые и правые части уравнений (3)–(4). Разделив их на n , получим

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n \vartheta_i}{n}. \quad (5)$$

При этом реальные погрешности приборов неизвестны, а известно лишь, что $|\vartheta_i| \leq \Delta$ для всех $i = 1, \dots, n$.

Для нахождения границы суммы случайных величин ϑ_i (а по совокупности приборов данного типа их погрешности можно считать случайными величинами), нужно знать их функции распределения. Как отмечалось выше, эти функции по экспериментальным данным вряд ли можно найти. Однако для сложных по устройству приборов часто можно считать распределение их погрешностей симметричным. Как правило, математическое ожидание распределения близко к погрешностям тех эталонов, с помощью которых эти приборы поверяют. В первом приближении принимается $M[\vartheta_i] = 0$.

Если погрешности приборов имеют равномерное распределение, то доверительная граница суммы случайных величин равна

$$\Theta_1 = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta^2} = k\Delta\sqrt{n}. \quad (6)$$

Отсюда доверительная погрешность оценки

$$\Delta_{\Sigma 1} = \frac{\Theta_1}{n} = \frac{k\Delta}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

Если распределение погрешностей приборов считать нормальными и $\Delta = z_{\frac{1+\alpha}{2}} \sigma$, то

$$\Theta_2 = z_{\frac{1+\alpha}{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} = z_{\frac{1+\alpha}{2}} \sigma \sqrt{n} = \Delta \sqrt{n}, \quad (8)$$

тогда

$$\Delta_{\Sigma 2} = \frac{\Theta_2}{n} = \frac{\Delta}{\sqrt{n}}. \quad (9)$$

Эта оценка отвечает тому же уровню доверительной вероятности α , который был принят при установлении предела допускаемой погрешности Δ . Сравнение $\Delta_{\Sigma 1}$ и $\Delta_{\Sigma 2}$ показывает, что они отличаются лишь множителем k , который в зависимости от доверительной вероятности может колебаться от 1,1 ($\alpha = 0,95$) до 1,4 ($\alpha = 0,99$).

Среднее взвешенное значение результатов сличений СИ при необходимости вычисляют по формуле [7]

$$x_{\text{срв}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \frac{1}{S_{x_i}^2 + S_{\Theta_{x_i}}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_{x_i}^2 + S_{\Theta_{x_i}}^2}}. \quad (10)$$

Прогнозирование состояния МХ СИ с учетом процедур, описанных в работах Е. О. Грубо и Л. В. Ефремова [5, 6], осуществляется на основе:

- анализа данных об изменении МХ на интервале наблюдения в дискретные моменты времени;
- построения математической модели дрейфа, выражающей зависимость исследуемой МХ от времени;
- экстраполяции значений исследуемой МХ на область прогноза;
- оценки адекватности определения метрологического ресурса сводится к проверке адекватности модели дрейфа МХ, полученной на основе результатов проведения поверки¹.

¹ Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений виброперемещения, виброскорости, виброускорения и углового ускорения : приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2772 от 27.12.2018 ; Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений звукового давления в воздушной среде и аудиоскал : приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2537 от 30.11.2018.

Прогнозирование скорости дрейфа погрешности СИ, как правило, проводилось с применением следующих моделей: средняя скорость дрейфа, усредненная по нескольким отсчетам, средняя скорость дрейфа, оцененная регрессионным методом, а также скорость дрейфа, оцененная методами простой, линейно-взвешенной или экспоненциальной скользящей средней. Сопоставление проводится не только моделированием, но и на основе обработки результатов экспериментальных исследований¹.

Таким образом, методика контроля метрологических характеристик на основе групповой оценки состоит из следующих этапов:

1) анализ функционирования поверочных схем для СИ единиц виброакустических величин с целью выбора эталона, подлежащего замене соответствующей группой СИ, применяемых в организации;

2) формирование возможных вариантов состава групповых средств измерений (методом перебора) – для замены эталона групповым СИ, сформированным из СИ, подлежащих контролю, на основе анализа номенклатуры и количества СИ, имеющихся в распоряжении организации;

3) построение модели ухода погрешности для каждого СИ, отобранного для группового СИ, за 3–5 лет и модели ухода погрешности группового СИ на основе статистических данных в протоколах поверки о количественных значениях погрешностей СИ;

4) оценка метрологического запаса для каждого СИ группы и для группового СИ с расчетной оценкой времени наступления метрологического отказа для СИ и группового СИ;

5) расчет общей погрешности группового СИ с учетом количества СИ, входящих в состав группового СИ и их погрешностей;

6) экспериментальное определение отклонения (погрешности) каждого СИ, входящего в группу, от средневзвешенного значения с применением допускового контроля, используемого при проведении поверки СИ;

7) анализ результатов и принятие решения о направлении СИ в поверку.

С учетом приведенных выше положений авторами были проведены экспериментальные исследования по возможности применения групповой оценки для контроля МХ виброакустических каналов измерительных комплексов в процессе их эксплуатации.

По результатам анализа Государственных поверочных схем (ГПС) для средств измерений виброакустических величин (звукового давления в воздушной среде и виброускорения) и методик поверки определено, что поверка комплексов проводится с применением рабочего эталона (системы измерительной виброакустической ВС-321)². Пределы относительной погрешности воспроизведения звукового давления (акустический калибратор) на частоте 1000 Гц $\pm 0,2$ дБ ($\pm 2,3$ %), пределы относительной погрешности воспроизведения параметров вибрации на частоте 200 Гц $\pm 1,0$ %.

Для формирования группового СИ по звуковому давлению было выбрано четыре акустических канала четырех комплексов программно-аппаратных для проведения акустических и виброакустических измерений «Спрут-СР». Для формирования группового СИ по виброускорению было выбрано четыре вибрационных канала аналогичного комплекса «Спрут-СР».

Формирование групповых СИ проводилось с учетом следующих правил:

– средства измерений должны быть однородны по назначению и иметь действующие свидетельства о поверке;

– применяются СИ со сроком службы меньше гарантийного срока (службы хранения) и коэффициентом использования меньше 0,95;

– могут применяться резервные СИ, находящиеся на хранении;

– наличие сведений о конкретных погрешностях измерений в свидетельствах о поверке на СИ;

– наличие подтверждения стабильности воспроизведения звукового давления с помощью поверенного акустического калибратора и виброускорения системой ВС-321.

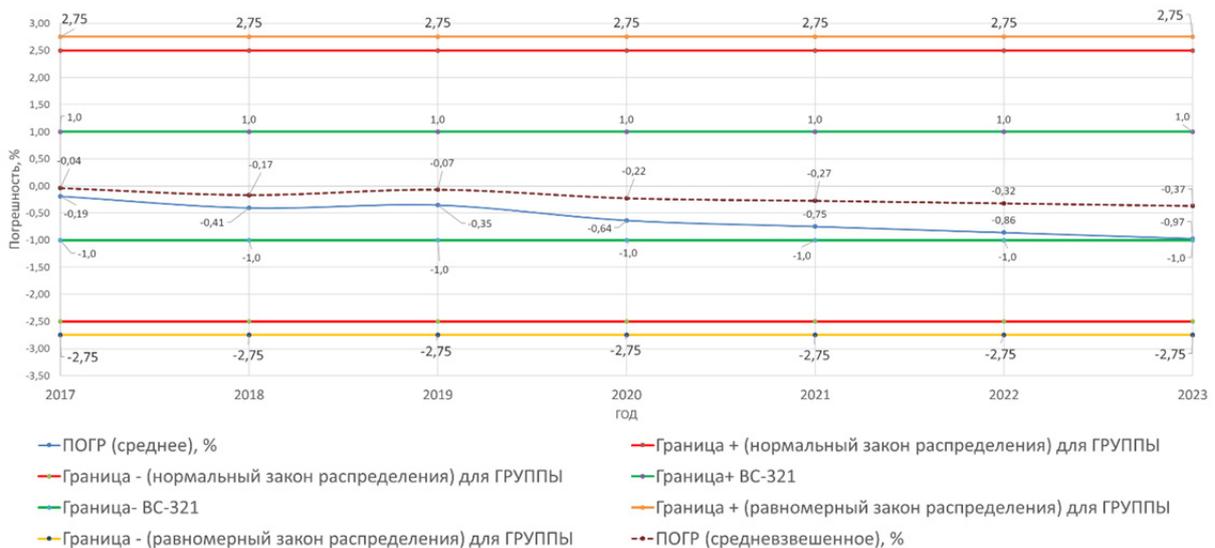
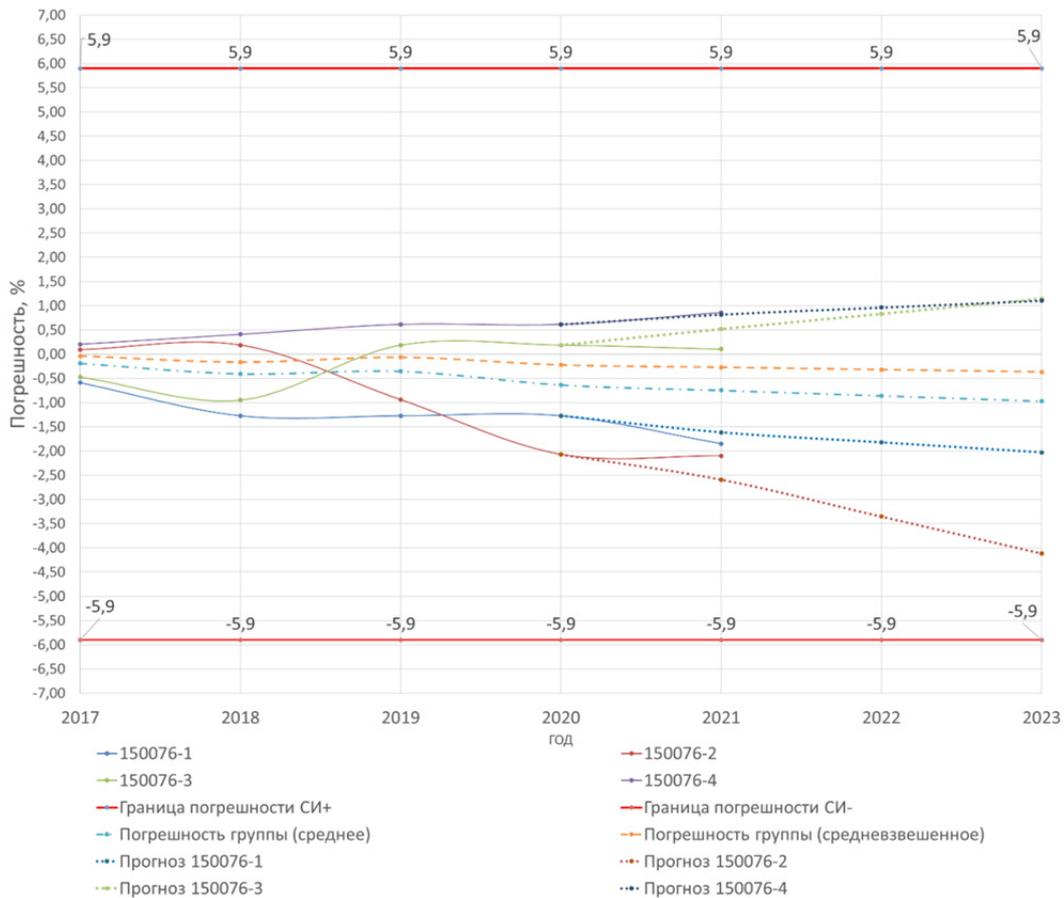
Для контроля МХ СИ организации, не вошедших в групповое СИ, формируются следующие группы СИ из 3–5 приборов аналогичным образом.

¹ РМГ 74-2004. ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.

² ИСО 10012-1:1992. Требования по обеспечению качества измерительного оборудования. Часть 1. Система метрологического подтверждения для измерительного оборудования.

Процедура контроля МХ каждого СИ (измерительного канала) из группы проводилась по методике поверки на комплексе «Спрут-СР», при этом оценка погрешности виброакустических каналов комплекса проводилась не сравнением с показаниями эталонных СИ из состава РЭ (ВС-321), а сравнением с полученной средневзвешенной групповой оценкой.

Результаты построения модели ухода погрешности каждого СИ из группы и модель ухода погрешности группового СИ представлены на рис. 2–5.



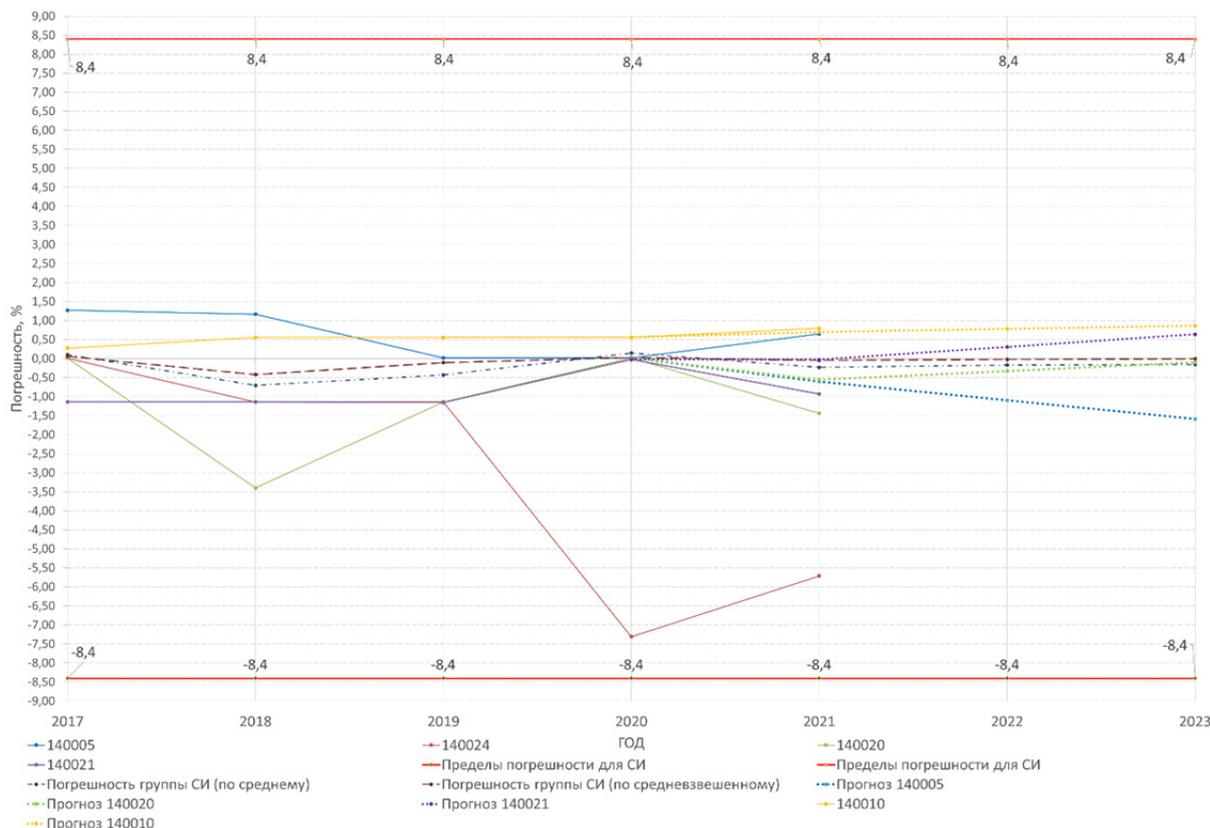


Рис. 4. Модели дрейфа погрешностей акустических каналов комплексов и группового СИ на их основе с прогнозом до 2023 г. (после построения их прогностических моделей, на основе статистических данных комплекс с зав. № 140024 исключен из группы, так как скорость дрейфа модели ухода его погрешности показывает, что метрологический отказ может наступить по истечении двух месяцев после его поверки в 2020 г.)

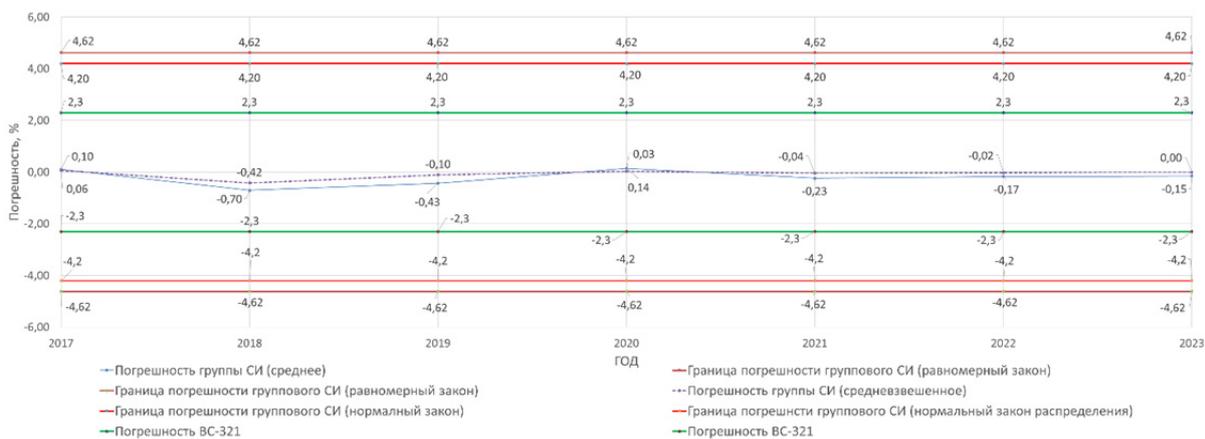


Рис. 5. Графики моделей погрешности группового СИ на основе акустических каналов комплексов «Спрут-СР»

Исходные данные и результаты расчетов погрешностей СИ приведены в табл. 1 и 2. На рис. 3 приведены модели ухода погрешностей пяти комплексов, выбранных для формирования группы.

Определение погрешности каждого СИ, входящего в группу, от средневзвешенного значения проводилось с применением допускового контроля, используемого при проведении поверки СИ. Это позволяет избежать трудностей, связанных с вероятностным обоснованием выбора соотношения между погрешностями эталонного и поверяемых приборов [4].

Таблица 1

Групповая оценка Спрут-СР по четырем вибрационным каналам

Год	Зав. № 150076				Пределы погрешности для СИ, %	Расчитанное значение погрешности для группы СИ (среднее), %	Расчитанное значение погрешности для группы СИ (средневзвешенное), %	Пределы погрешности для группы (равномерный закон)	Пределы погрешности для группы (нормальный закон)	Пределы погрешности для ВС-321 (рабочий эталон по ГПС)
	1 кан.	2 кан.	3 кан.	4 кан.						
2017	-0,59	0,09	-0,47	0,20	±5,9	-0,19	-0,04	±2,75	±2,5	±1,0
2018	-1,27	0,19	-0,95	0,41	±5,9	-0,41	-0,17	±2,75	±2,5	±1,0
2019	-1,27	-0,94	0,19	0,61	±5,9	-0,35	-0,07	±2,75	±2,5	±1,0
2020	-1,27	-2,07	0,19	0,61	±5,9	-0,64	-0,22	±2,75	±2,5	±1,0
2021	-1,85	-2,10	0,10	0,86	±5,9	-0,75	-0,27	±2,75	±2,5	±1,0
Прогноз на 2021	-1,62	-2,59	0,52	0,82	±5,9	-0,72	-0,24	±2,75	±2,5	±1,0

Таблица 2

Групповая оценка Спрут-СР по четырем акустическим каналам

Год	140005				Пределы погрешности для СИ, %	Расчитанное значение погрешности для группы СИ (среднее), %	Расчитанное значение погрешности для группы СИ (средневзвешенное), %	Пределы погрешности для группы (равномерный закон)	Пределы погрешности для группы (нормальный закон)	Пределы погрешности для ВС-321
	1 кан.	2 кан.	3 кан.	4 кан.						
2017	1,27	0,28	0,01	-1,14	±8,4	0,10	0,06	±4,62	±4,2	±2,3
2018	1,17	0,56	-3,40	-1,14	±8,4	-0,70	-0,42	±4,62	±4,2	±2,3
2019	0,02	0,56	-1,14	-1,16	±8,4	-0,43	-0,10	±4,62	±4,2	±2,3
2020	0,02	0,56	0,02	-0,02	±8,4	0,14	0,03	±4,62	±4,2	±2,3
2021	0,65	0,80	-1,44	-0,93	±8,4	-0,23	-0,04	±4,62	±4,2	±2,3
Прогноз на 2021	-0,61	0,70	-0,56	-0,03	±8,4	-0,12	-0,19	±4,62	±4,2	±2,3

Задача допускового контроля решается следующим путем. Как следует из определения, годным (соответствующим требованиям нормативной документации) является СИ, для которого $|x - A| \leq \Delta$, и негодным (несоответствующим требованиям нормативной документации), если $|x - A| > \Delta$.

Аналогичные неравенства справедливы и для эталона: $|y - A| \leq \Delta_{гр}$, если он годен, и $|y - A| > \Delta_{гр}$, если не годен. При $x > A$ для годного СИ $x - A \leq \Delta_{гр}$. Но $y - \Delta_{гр} \leq A \leq y + \Delta_{гр}$. Поэтому, заменяя A на $y - \Delta_{гр}$, получим для годного СИ

$$x - y \leq \Delta - \Delta_{гр}. \quad (11)$$

Аналогично при $x < A$ можно получить для годного СИ

$$x - y \geq -(\Delta - \Delta_{гр}). \quad (12)$$

Повторяя выкладки для негодного СИ, получаем соответствующие неравенства:

$$x - y > \Delta + \Delta_{гр}, \quad (13)$$

$$x - y < -\Delta - \Delta_{гр}. \quad (14)$$

Рассмотренные соотношения представлены на графиках (рис. 6).

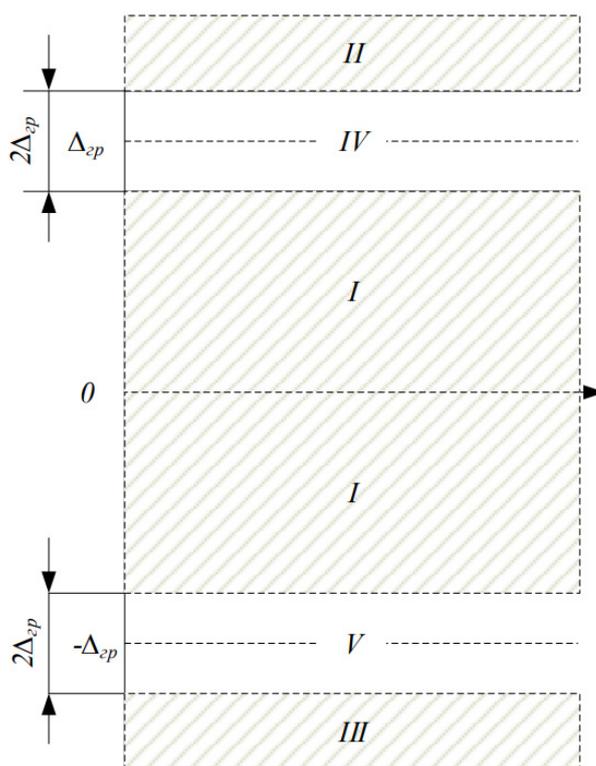


Рис. 6. Зоны безусловной годности (I), безусловного брака (II и III) и неопределенности (IV и V)

Неравенствам (11) и (12) отвечает область I. Средства измерений, для которых разности $x - y$ попадут в эту область, безусловно, годные независимо от того, в каком отношении находятся погрешности образцового и поверяемого прибора. Неравенствам (13) и (14) отвечают области II и III. Средства измерений, для которых разности $x - y$ попадут в область II или III, безусловно, негодные.

Часть поверяемых средств измерений может иметь такие погрешности, что

$$\Delta - \Delta_{гр} < x - y < \Delta + \Delta_{гр}. \quad (15)$$

Этим погрешностям отвечают области IV и V. Такие средства измерений, по существу, нельзя ни забраковать, ни признать годными, так как среди них есть в действительности и годные и негодные. Если их признать годными, то к потребителю попадет какое-то число негодных приборов. Это брак поверки, от которого может пострадать потребитель. Если же все такие сомнительные приборы забраковать, то будет забраковано какое-то число в действительности годных приборов. В тех случаях, когда процент сомнительных средств измерений оказывается значительным, а средства измерений дороги и трудно ремонтируются, целесообразна их дополнительная проверка, например, с применением групп СИ большей точности, портативных калибраторов или введением в СИ средств встроенного контроля с применением адаптивной модели ухода МХ СИ.

Результаты определения погрешности СИ виброакустических величин по предложенной методике контроля с учетом статистики по уходу их погрешности за предыдущие четыре года позволяет сделать следующие выводы:

1. Погрешность СИ, определенная с применением группового СИ и системы ВС-321, не превысила допускаемые пределы погрешности поверяемых СИ, указанные в НД. Это подтверждает возможность применения групповой оценки для контроля МХ СИ виброакустических величин с нормированными погрешностями в диапазоне от $\pm 5,9$ до $\pm 8,4$ % (без применения эталонных СИ).

2. Прогноз состояния МХ (основной погрешности) для средств измерений виброакустических величин, проведенный с использованием моделей скорости дрейфа, оцененных с помощью линейно-взвешенной и (или) экспоненциальной скользящей средней, составляет:

- для вибрационных каналов (с максимальной скоростью дрейфа) ожидаемый выход погрешности за допускаемые пределы 4–5 лет;
- для акустических каналов (с максимальной скоростью дрейфа) ожидаемый выход погрешности за допускаемые пределы 6–7 лет.

Соответственно, срок очередной поверки СИ виброакустических величин может соответствовать назначенному сроку службы, определенному в эксплуатационной документации.

3. Данные по прогнозу ухода погрешности могут быть представлены разработчику СИ для принятия решения о возможности увеличения ИМП установленным порядком в соответствии с положениями.

4. Реализация предложенной методики контроля, основанной на методе групповой оценки, позволит совершенствовать порядок и методы пересмотра ИМП между подтверждениями исправности СИ в соответствии с требованиями международных стандартов, которые предусматривают контроль дрейфа систематической погрешности СИ при эксплуатации.

5. Подтверждение стабильности метрологических характеристик СИ в течение назначенного срока службы с применением предложенной методики может быть рассмотрено как основание для назначения ИМП конкретных СИ, равного назначенному сроку службы.

Список литературы

1. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Л. : Энергия, 1978, 262 с.
2. Безуглов Д. А., Поморцев П. М. Автономные средства измерений : монография. Ростов н/Д., 2007. 168 с.
3. Юхнов В. И., Безуглов Д. А., Решетникова И. В., Енгибарян И. А. Задача определения метрологических характеристик автономных средств измерений и основные направления ее решения // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-3.
4. Розанов Ю. А. Случайные процессы (краткий курс). М. : Наука, 1971. 282 с.
5. Грубо Е. О., Королев П. Г. Методика расчета метрологического ресурса измерительного канала для средств измерений с автоматической коррекцией // Сборник докладов 63-й Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава университета. СПб., 2010. С. 228–233.
6. Ефремов Л. В. Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Известия вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7.
7. Данилов А. А., Спутнова Д. В. Анализ моделей описания нестабильности средств измерений // 175 лет ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 14–15 июля 2017 г.). СПб., 2017. С. 49.

References

1. Rabinovich S.G. *Pogreshnosti izmereniy = Measurement errors*. Leningrad: Energiya, 1978:262. (In Russ.)
2. Bezuglov D.A., Pomortsev P.M. *Avtonomnye sredstva izmereniy: monografiya = Autonomous measuring instruments : monograph*. Rostov-on-Don, 2007:168. (In Russ.)
3. Yukhnov V.I., Bezuglov D.A., Reshetnikova I.V., Engibaryan I.A. The problem of determining the metrological characteristics of autonomous measuring instruments and the main directions of its solution. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2015;(2-3). (In Russ.)
4. Rozanov Yu.A. *Sluchaynye protsessy (kratkiy kurs) = Random processes (short course)*. Moscow: Nauka, 1971:282. (In Russ.)
5. Grubo E.O., Korolev P.G. Methodology for calculating the metrological resource of the measuring channel for measuring instruments with automatic correction. *Sbornik dokladov 63-y Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava universiteta = Collection of reports of the 63rd Scientific and Technical Conference of the University teaching staff*. Saint Petersburg, 2010:228–233. (In Russ.)
6. Efremov L.V. Stock of metrological reliability as a criterion for assessing the serviceability of measuring instruments. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = News of universities. Instrumentation*. 2010;53(7). (In Russ.)
7. Danilov A.A., Sputnova D.V. Analysis of models describing the instability of measuring instruments. *175 let VNIIM im. D. I. Mendeleeva i Natsional'noy sisteme obespecheniya edinstva izmereniy: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Sankt-Peterburg, 14–15 iyulya 2017 g.) = 175 years of D. I. Mendeleev VNIIM and the National system for ensuring the unity of measurements : collection of dokl. International Scientific and Practical Conference (St. Petersburg, July 14-15, 2017)*. Saint Petersburg, 2017:49. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Олегович Лавров

кандидат технических наук, доцент,
заместитель начальника кафедры
метрологического обеспечения вооружения,
военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: 9432923@mail.ru

Roman O. Lavrov

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

Александр Николаевич Ольховский

старший научный сотрудник,
Главный научный метрологический центр
Министерства обороны Российской Федерации
(Россия, г. Мытищи, ул. Комарова, 13)
E-mail: rusregister.ano@mail.ru

Aleksandr N. Ol'khovskiy

Senior researcher,
Main Scientific Metrological Center
Ministry of Defense of the Russian Federation
(13 Komarova street, Mytishchi, Russia)

Юрий Александрович Кувькин

старший научный сотрудник,
Главный научный метрологический центр
Министерства обороны Российской Федерации
(Россия, г. Мытищи, ул. Комарова, 13)
E-mail: original.rus@mail.ru

Yuri A. Kuvykin

Senior researcher,
Main Scientific Metrological Center
Ministry of Defense of the Russian Federation
(13 Komarova street, Mytishchi, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 06.07.2021

Поступила после рецензирования/Revised 13.07.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

АНАЛИЗ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

**А. А. Трофимов¹, М. А. Полина², А. В. Гладков³,
Д. В. Токарев⁴, Т. Н. Попченкова⁵, С. А. Здобнов⁶**

^{1,2,3,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ alex.t1978@mail.ru, ^{2,3,4,5} iit@pnzgu.ru, ⁶ sa_zdobnov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современное развитие ракетно-космической техники, вооружения и военной техники, авиации, двигателестроения, изделий для атомной энергетики и т.п. во многом зависит от технического уровня использованных в них информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) подвижных многофункциональных комплексов. В специальной технике ИИУС эксплуатируется при воздействии большого количества дестабилизирующих факторов: ударов, вибраций, линейных ускорений, акустического шума, широкого диапазона воздействующих температур. *Материалы и методы.* При решении поставленных задач использованы метод образцовых мер, метод обратного преобразования введения точных и стабильных обратных преобразователей кода в перемещение, метод вспомогательных измерений, алгоритм функциональной обработки. *Результаты.* Проведена систематизация типовых структур и алгоритмов работы фотоэлектронных информационно-измерительных систем контроля параметров пространственного положения объектов (ФИИСП), предложена систематизация ФИИСП. Предложены основные принципы построения фотоэлектрических преобразователей. Разработана структурная схема, на основе которой возможно создание преобразователей определения пространственного положения для информационно-измерительных и управляющих систем.

Ключевые слова: фотоэлектронный преобразователь, чувствительный элемент, структурная схема, систематизация, дестабилизирующие факторы

Для цитирования: Трофимов А. А., Полина М. А., Гладков А. В., Токарев Д. В., Попченкова Т. Н., Здобнов С. А. Анализ и систематизация основных типов фотоэлектронных преобразователей, используемых при построении информационно-измерительных систем положения объектов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 24–31. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-3

ANALYSIS AND SYSTEMATIZATION OF MAJOR TYPES PHOTOELECTRONIC CONVERTERS USED IN CONSTRUCTION OF INFORMATION-MEASURING OBJECT POSITION SYSTEMS

**A.A. Trofimov¹, M.A. Polina², A.V. Gladkov³,
D.V. Tokarev⁴, T.N. Popchenkova⁵, S.A. Zdobnov⁶**

^{1,2,3,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia

¹ alex.t1978@mail.ru, ^{2,3,4,5} iit@pnzgu.ru, ⁶ sa_zdobnov@mail.ru

Abstract. *Background.* The modern development of rocket and space technology, weapons and military equipment, aviation, engine building, products for nuclear energy, etc., largely depends on the technical level of the information and measurement and control systems (IIUS) of mobile multi-functional systems used in them. In special equipment, the IIUS is operated under the influence of a large number of destabilizing factors: shocks, vibrations, linear accelerations, acoustic noise, a wide range of acting temperatures. *Materials and methods.* In solving the set tasks, the method of sample-out measures, the method of inverse conversion of the introduction of accurate and stable inverse code converters into movement, the method of auxiliary measurements, and the functional processing algorithm were used. *Results.* Standard structures and algorithms of operation of photoelectronic information-measuring systems for monitoring parameters of spatial position of objects (FILISP) were systematized, systematization of FILISP was proposed. The basic

principles of photovoltaic converters construction are proposed. A structural diagram has been developed on the basis of which it is possible to create spatial position transducers for information-measuring and control systems.

Keywords: photoelectronic converter, sensitive element, structural diagram, system-tization, destabilizing factors

For citation: Trofimov A.A., Polina M.A., Gladkov A.V., Tokarev D.V., Popchenkova T.N., Zdobnov S.A. Analysis and systematization of major types photoelectronic converters used in construction of information-measuring object position systems. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4): 24–31. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-3

Современные тенденции развития информационно-измерительных и управляющих систем подвижных многофункциональных комплексов (строительная техника, самолеты, космические аппараты, ракеты, наземные комплексы вооружения и т.д.) требуют применения высокоточных, простых в изготовлении и стабильных в экстремальных условиях эксплуатации ИИУС контроля параметров пространственного положения объектов. Такие ИИУС представляют собой совокупность перемещающегося геометрического тела (оси антенн и сканирующих зеркал, различного рода поворотные устройства, чувствительные элементы датчиков аэродинамических углов, измерителей давления среды и т.д.) и механически или оптически связанных с ним преобразователей пространственного положения. Получившие широкое распространение в ИИУС многофункциональные комплексы фотоэлектронных преобразователей отличаются высокой чувствительностью и быстродействием, малыми габаритами, возможностью эффективного применения различных методов стабилизации выходных параметров при воздействии внешних дестабилизирующих факторов.

В настоящее время получили распространение различные методы моделирования (ФИИСП), в своем большинстве основанные на статистическом подходе к оценке информативных параметров перемещающегося объекта и влияния внешних дестабилизирующих факторов на выходные параметры преобразователей пространственного положения. Созданы частные модели пространственно-информационных и энергоинформационных процессов в фотоэлектронных преобразователях. Вместе с тем проблема создания и применения методов моделирования фотоэлектронных систем измерения параметров положения объектов остается актуальной. В известных моделях отсутствует комплексный учет функциональных связей параметров инструментальных погрешностей с эксплуатационными факторами. Имеет место незавершенность исследований в области применения традиционных и поиска новых путей повышения стабильности и точности ФИИСП в реальном масштабе времени. Не исследованы вопросы модуляции оптического сигнала от внешнего источника, преобразования распределенной освещенности в электрический сигнал в фоточувствительных элементах с накоплением заряда и в фотоэлектронных преобразователях с прямым измерением освещенности, применения согласованной (оптимальной) фильтрации для выделения точечных объектов.

Все это обуславливает необходимость развития теории фотоэлектронного преобразования положения объектов и разработки методов моделирования ФИИСП, основанных на комплексном учете воздействия дестабилизирующих факторов.

Анализ литературных источников [1–4] показывает, что фотоэлектронные информационно-измерительные системы контроля параметров положения объектов, применяемые в подвижных многофункциональных комплексах, могут быть систематизированы по многим признакам, основными из которых являются: характер измеряемых пространственных положений, форма контакта чувствительных элементов (ЧЭ) преобразователей пространственного положения с перемещающимся объектом, конструктивное исполнение, структура построения, вид промежуточного и выходного сигналов (рис. 1).

По характеру пространственного положения различают ФИИСП с линейными, угловыми и комбинированными многомерными перемещениями объекта контроля. В целом ФИИСП представляет собой совокупность механически или оптически связанных узлов: перемещающегося объекта (ось антенны, отражающего зеркала, подвижный штوك, автономный источник излучения и др.) и одно-, двухкоординатных оптоэлектронных преобразователей пространственного положения (ОПП) [1]. Совокупность выходной информации ОПП, представленная в виде, удобном для потребителя, является выходной информацией ФИИСП [5].

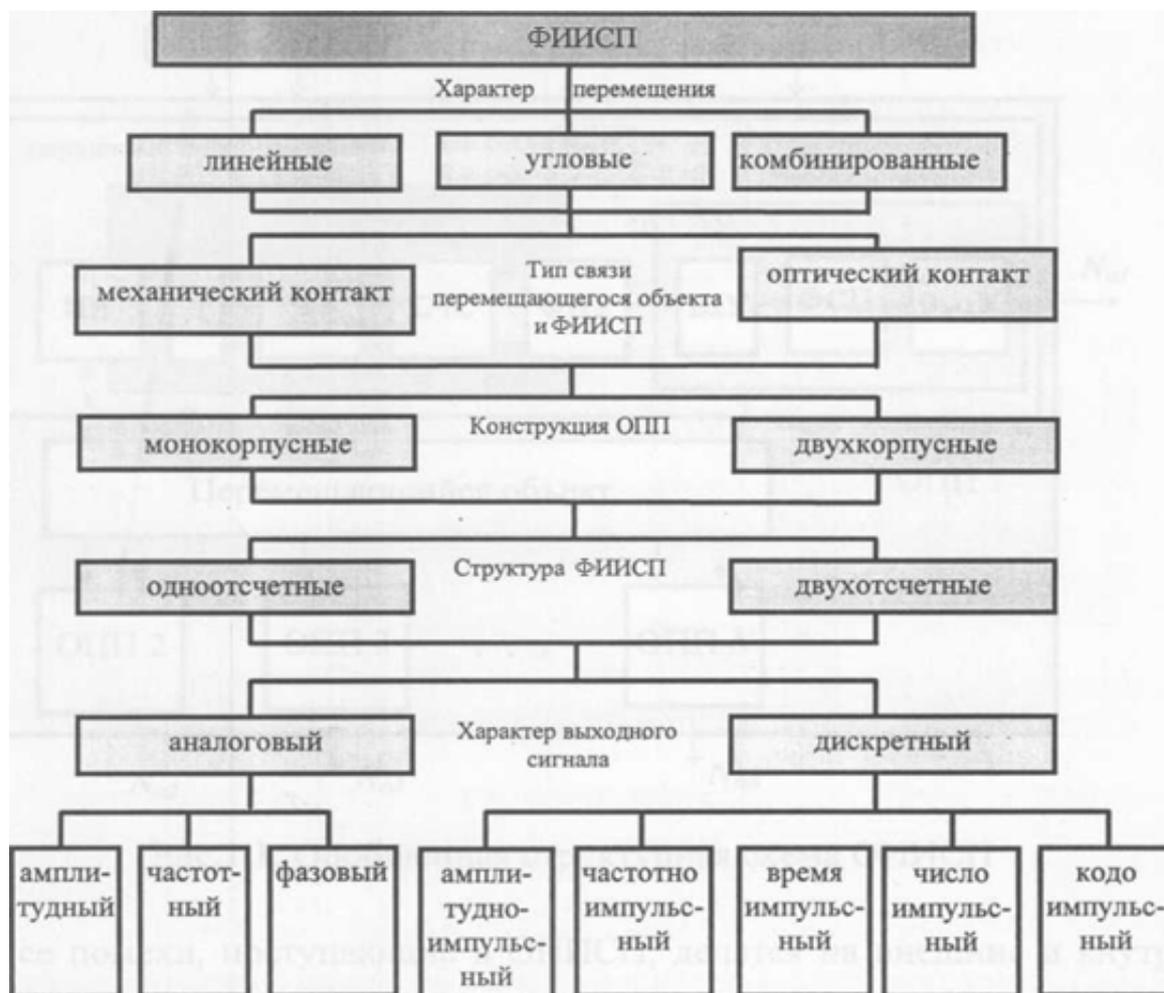


Рис. 1. Систематизация ФИИСП

По количеству отсчетов ФИИСП подразделяются на одноотсчетные и многоотсчетные. В одноотсчетных системах функции преобразования возложены на модулирующее сопряжение ЧЭ с расположенными по определенному закону считывающими элементами (СчЭ), которые выдают информацию о перемещении объекта в виде оптического или потенциального сигнала. Системы, в которых из оптических или электрических сигналов извлекается дополнительная информация, получили наименование двухотсчетных, трехотсчетных и т.д. Первый отсчет считается грубым и определяется геометрическими параметрами ЧЭ и СчЭ. Второй и другие отсчеты (промежуточный, точный) получаются в результате интерполяции и дополнительной обработки одного из параметров сигнала с выхода СчЭ.

На рис. 2 показана обобщенная структурная схема ФИИСП. Перемещающийся объект оптически или механически связан с преобразователями перемещений, каждый из которых определяет, как правило, одну или две координаты перемещения. Оптические лучи от источников излучения ИИ проходят через диафрагму Д, среду распространения света и оптическую систему ОС к ЧЭ. С выхода ЧЭ, связанного механически или оптически с перемещающимся объектом, промодулированные по одному из параметров световые лучи воспринимаются считывающей системой СчС, состоящей из одного или нескольких считывающих элементов (СчЭ). После модулирующего сопряжения (МС) чувствительного и считывающих элементов сформированные оптические сигналы попадают на фотоприемное устройство (ФПУ), в котором из них получаются электрические сигналы, пропорциональные измеряемой величине. Эти сигналы подвергаются обработке в электронном узле (ЭУ), состоящем из входного устройства ВхУ, формирователя сигнала перемещения ФСП и выходного устройства ВыхУ, которое выдает информацию N_a в виде, удобном для потребителя.

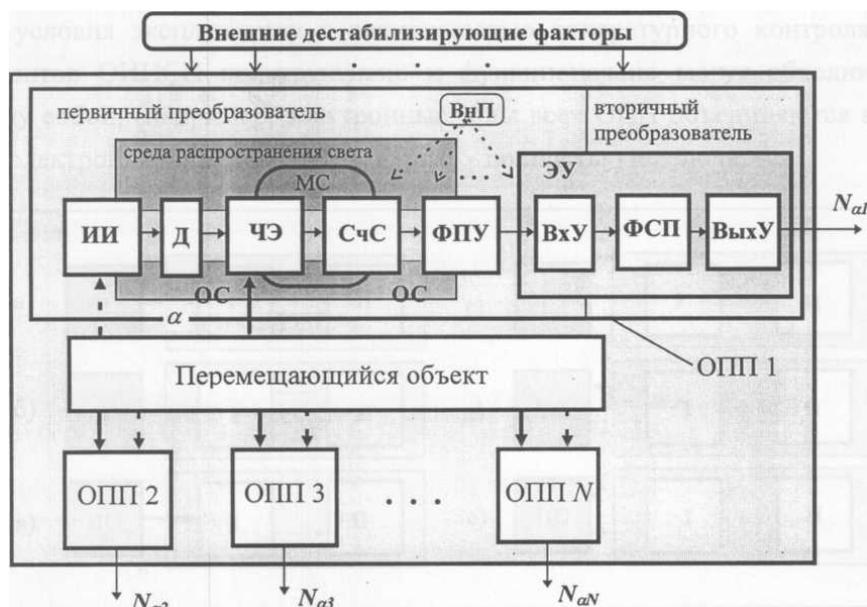


Рис. 2. Обобщенная структурная схема ФИИСП

Все помехи, поступающие в ФИИСП, делятся на внешние и внутренние. Внешние помехи и дестабилизирующие факторы (ВДФ), вызывающие паразитную модуляцию и затухание светового потока, шум на выходе усилителя фототока, – это виброударные воздействия на кинематические звенья, влияние радиационного облучения, температурных и электромагнитных полей на оптические, механические и электронные элементы и т.д.

Внутренние помехи (ВнП) или шумы носят, как правило, аддитивный характер и генерируются излучателем, фотоприемником, усилителем, элементами нагрузочной цепи, регистраторами и формирователями сигнала перемещения. Обычно ограничиваются оценкой влияния шумов первого каскада усиления, где полезный сигнал относительно мал в сравнении с шумами.

Конструктивно ФИИСП выполняются в едином корпусе или разделены на связанные между собой отдельные конструктивные блоки (рис. 3). Первичные преобразователи устанавливаются непосредственно у измеряемого объекта, куда обычно ограничен или отсутствует доступ для проверки работоспособности ФИИСП. Вторичные преобразователи выносятся в комфортные условия эксплуатации с возможностью аппаратного контроля. Ряд элементов ФИИСП конструктивно и функционально могут объединяться между собой, другие – полностью исключаться.

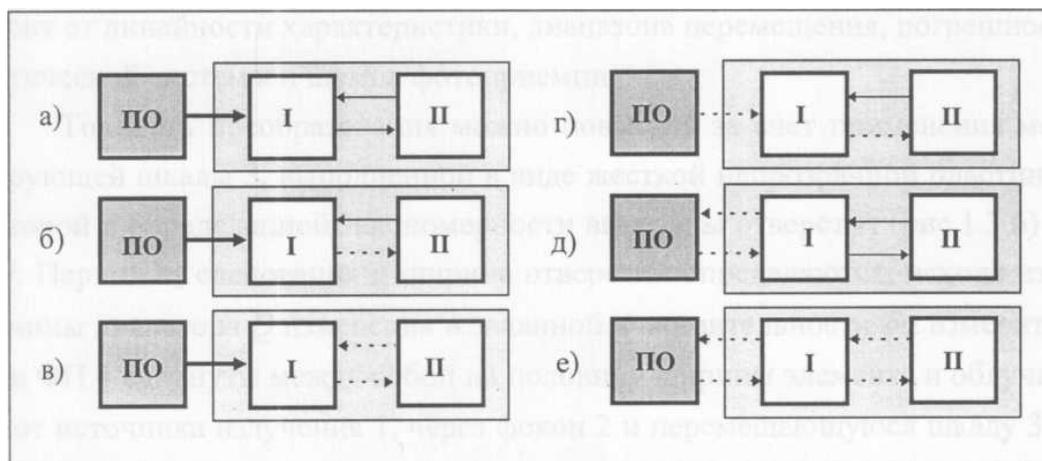


Рис. 3. Варианты разделения конструктивных блоков при кинематической и оптической связи ФИИСП с измеряемым объектом: ПО – перемещающийся объект; I, II – первый и второй конструктивные блоки; \longrightarrow – гальваническая связь; $\cdots\cdots\longrightarrow$ – оптическая связь; \blacktriangleright – кинематическая связь

Варианты конструктивного разделения ФИИСП:

- а) источники излучения и ФПУ находятся в первом конструктивном блоке и запрашиваются по гальваническим линиям связи, с выхода блока I на вход блока II подается электрический сигнал;
- б) источники излучения в блоке I, ФПУ – вынесены в блок II, оптическая связь осуществляется с помощью волоконных световодов;
- в) источники излучения и ФПУ вынесены в блок II;
- г) источник излучения – перемещающийся объект, ФИИСПУ могут размещаться в блоке I или в блоке II;
- д) источники излучения и ФПУ в блоке I;
- е) источники излучения и ФПУ в блоке II.

Метрологические и эксплуатационные параметры преобразователей зависят от достигнутого технического и технологического уровня в области материаловедения, точной механики, оптики, оптоэлектроники, микроэлектроники и цифровой техники. Первичные преобразователи – наиболее чувствительная к помехам и дестабилизирующим факторам часть ФИИСП [6, 7]. Снижение влияния помех и ВДФ на точность и стабильность преобразования, на эксплуатационную надежность ФИИСП в целом является одной из наиболее актуальных проблем при создании многофункциональных подвижных комплексов.

Предъявляемые к ФИИСП требования по точности и стабильности в значительной степени зависят от особенностей функционирования комплекса, характера выполняемых задач. К многофункциональным комплексам, на которых в том или ином виде могут устанавливаться ФИИСП, относятся летательные и космические аппараты, управляемые ракеты различного радиуса действия, подводные и надводные корабли, наземные стационарные и подвижные системы сопровождения и целеуказания. Диапазон преобразуемых линейных перемещений от единиц миллиметров до десятков сантиметров, угловые перемещения – от единиц градусов до полного оборота.

Для подвижных многофункциональных комплексов в настоящее время и в перспективе требуются простые в изготовлении, относительно недорогие, точные и стабильные ФИИСП, способные стабильно выдавать достоверную информацию и предотвращать выдачу информации к потребителям при возникновении явного или неявного параметрического отказа. Это предполагает создание ФИИСП, в которых, кроме традиционных способов стабилизации параметров и защиты конструктивных элементов, производится автокоррекция и допусковый контроль погрешностей, вызванных внешними дестабилизирующими факторами, применяются конструктивные, схемотехнические и алгоритмические методы повышения устойчивости к воздействию ВДФ. Такие ФИИСП могут разрабатываться на базе новых и серийных преобразователей.

Структура мероприятий по разработке и доработке ФИИСП для подвижных многофункциональных комплексов показана на рис. 4. Создание высокопрочных и параметрически стабильных материалов, вопросы резервирования узлов и элементов являются отдельными научными проблемами, которые в данной работе не рассматриваются. Объектами проводимых исследований являются обоснование принципов построения и математического моделирования фотоэлектронного преобразования положения в пространстве, реализация в моделях ФИИСП методов автокоррекции, помехоустойчивого кодирования перемещений, стабилизации параметров оптического и электрического сигналов.

Метод образцовых мер требует высокостабильных источников измеряемых единиц, что для первичного преобразователя сложно реализуемо в виде эталонных перемещений, но широко применяется во вторичном преобразователе в форме эталонных сигналов. Метод обратного преобразования основан на использовании введения точных и стабильных обратных преобразователей кода в перемещение. Метод легко реализуем во вторичных преобразователях, осуществляющих амплитудную интерполяцию сигнала с выхода первичного преобразователя. Реализация тестовых методов проходит с аппаратными затратами и низким быстродействием. Метод вспомогательных измерений требует построения моделей конкретных типов первичных преобразователей с целью выявления доминирующих составляющих ИП функционально связанных с параметрами ВДФ. Метод создает возможность непосредственного или косвенного измерения параметров ВДФ.

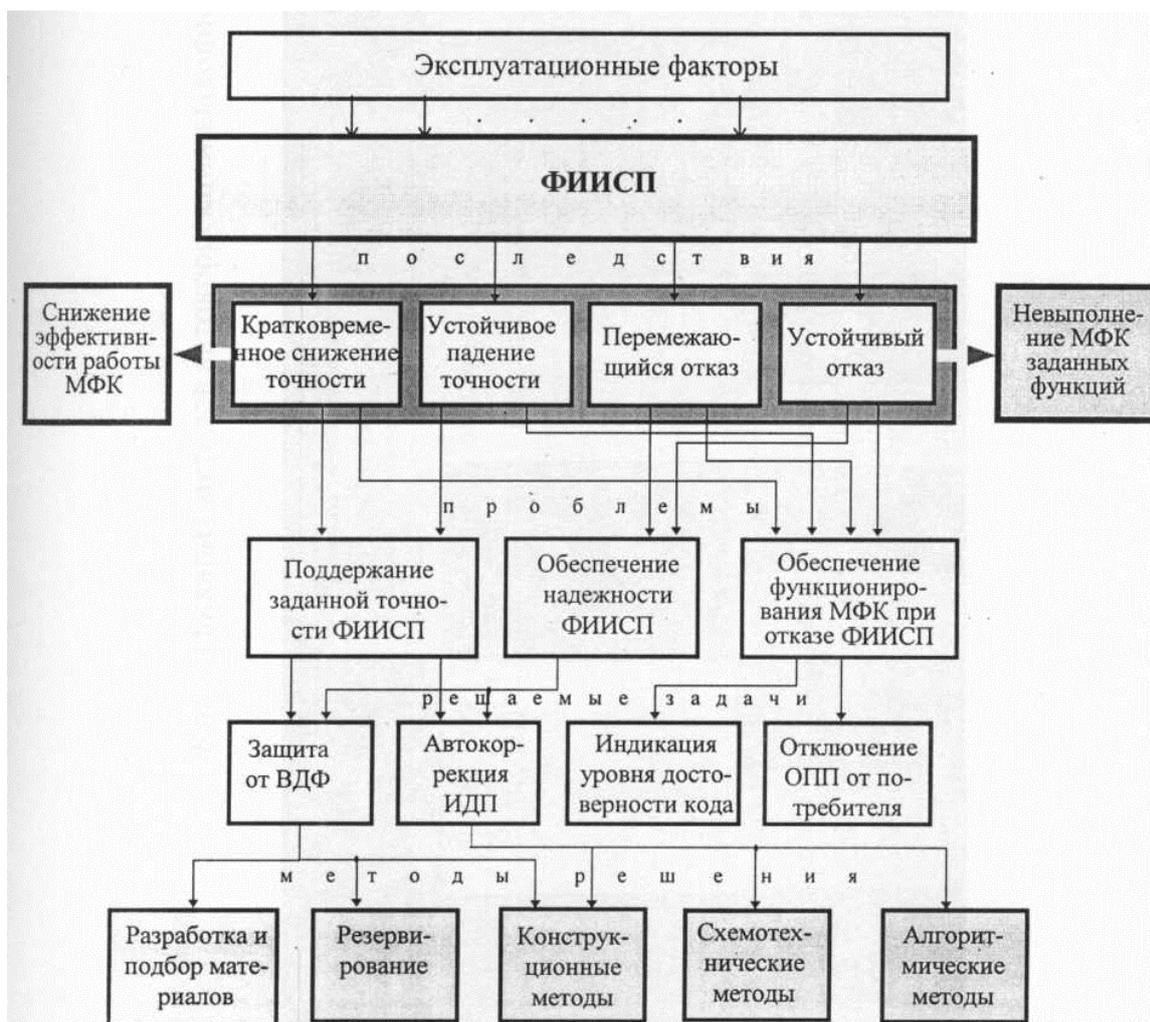


Рис. 4. Структура мероприятий по разработке ФИИСП для подвижных многофункциональных комплексов

Хорошие перспективы для повышения точности открывает использование алгоритмов функциональной обработки. Известные решения предусматривают либо введение дополнительных измерительных каналов, либо дополнительных циклов измерения в одном канале. Виды обработки: статистическая (усреднение), построение аппроксимационных полиномов, логическая и логико-цифровая обработка полнофазных сигналов по жесткой или гибкой программе. Статистическая обработка не всегда обеспечивает заданную точность даже при большом числе измерительных каналов. Более высокую точность и стабильность дает логическая обработка сигналов.

Исследование структурных схем и алгоритмических моделей ФИИСП и ОПП, анализ литературы по вопросам проектирования ИИУС указывают на необходимость систематизации знаний по особенностям работы ФИИСП с целью разработки рекомендаций по поддержанию и повышению их точности и стабильности при воздействии ВДФ.

В целом проблема исследований состоит в обеспечении высокой точности и стабильности ФИИСП в условиях воздействия ВДФ и включает в себя: анализ влияния ВДФ на параметры погрешностей ФИИСП; исследование пространственных и энергетических характеристик преобразователей перемещений; анализ влияния инструментальных и дополнительных погрешностей на параметры выходного сигнала ФИИСП; разработку алгоритмов работы и структурных схем ФИИСП и ОПП, устойчивых к воздействию ВДФ; выработку практических рекомендаций и предложений по проектированию и изготовлению ФИИСП.

С учетом поставленной проблемы задача исследований формулируется следующим образом: на основе данных о влиянии ВДФ на параметры ФИИСП необходимо разработать методы

моделирования, алгоритмы функционирования, структурные и конструктивные схемы ФИИСП, направленные на достижение требуемых значений точности и стабильности преобразования.

Поставленная задача определяет следующую структуру исследований: формирование математической модели оптоэлектронного преобразования перемещения геометрического тела, на основе которой строятся частные математические модели модулирующих сопряжений, в результате анализа которых определяются функциональные связи между погрешностями и параметрами выходного сигнала; моделирование ФИИСП и ОПП, в которых реализуются методы автокоррекции и допускового контроля ИП; разработка рекомендаций по созданию ФИИСП.

Показаны общие направления повышения стабильности преобразования и защиты потребителей от недостоверной информации. Определена структура исследований, которая включает: создание математических моделей фотоэлектронного преобразования, выявляющих пути компенсации погрешностей; определение границ возможностей их автокоррекции; поиск рациональных и эффективных структурно-алгоритмических и конструктивных способов повышения точности и стабильности преобразования.

Заключение

Проведен обзор и систематизация типовых структур и алгоритмов работы ФИИСП, предложена систематизация ФИИСП, а также приведены примеры реализации различных ФИИСП.

Изложены основные принципы построения фотоэлектрических преобразователей. Разработана обобщенная структурная схема, на основе которой возможно создание преобразователей определения пространственного положения для ИИУС.

Построены и исследованы модели функциональных связей ВДФ с параметрами ИП пространственного и энергетического характера. Для ФИИСП с конструктивным разделением первичных и вторичных преобразователей доминирующими ВДФ являются виброударные воздействия, температурные перепады и ионизирующее излучение, непосредственно воздействующие на кинематические звенья, оптические и фотоприемные элементы первичных преобразователей.

Список литературы

1. Леонович Г. И. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений для жестких условий эксплуатации. Самара, 1998. 264 с.
2. Преснухин Л. П. Фотоэлектрические преобразователи информации. М. : Машиностроение, 1974.
3. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. А., Нефедьев Д. И. Датчики частоты вращения : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. 80 с.
4. Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. 174 с.
5. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Соифера. М. : Физматлит, 2003. 784 с.
6. 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.
7. Кирьянов В. Л., Гладков А. В., Трофимов А. А. Магнитооптический датчик частоты вращения // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации «Шляндинские чтения–2020» : сб. ст. по материалам Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. С. 16–18.

References

1. Leonovich G.I. *Optoelektronnyye tsifrovyye datchiki peremeshcheniy dlya zhestkikh usloviy ekspluatatsii = Optoelectronic digital displacement sensors for harsh operating conditions*. Samara, 1998:264. (In Russ.)
2. Presnukhin L.P. *Fotoelektricheskie preobrazovateli informatsii = Photoelectric converters of information*. Moscow: Mashinostroeniye, 1974. (In Russ.)
3. Dmitrienko A.G., Trofimov A.A., Nefed'ev D.I. *Datchiki chastoty vrashcheniya: ucheb. posobie = Rotational speed sensors : textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2015:80. (In Russ.)
4. Trofimov A.N., Trofimov A.A. *Vzaimoinduktivnyye datchiki peremeshcheniy: monografiya = Mutually inductive displacement sensors : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2009:174. (In Russ.)
5. Soyfer V.A. (ed.). *Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy = Methods of computer image processing*. Moscow: Fizmatlit, 2003:784. (In Russ.)

6. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
7. Kir'yakov V.L., Gladkov A.V., Trofimov A.A. Magneto-optical speed sensor. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii – «Shlyandinskie chteniya 2020»: sb. st. po materialam Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information "Shlyandinsky readings–2020" : collection of articles based on the materials of the International scientific and technical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:16–18. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksey A. Trofimov

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

Мария Александровна Полина

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: polina.marya2015@yandex.ru

Mariya A. Polina

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

Алексей Владимирович Гладков

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

Aleksey V. Gladkov

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

Денис Вячеславович Токарев

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

Denis V. Tokarev

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

Татьяна Николаевна Попченкова

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

Tat'yana N. Popchenkova

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

Сергей Александрович Здобнов

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

Sergey A. Zdobnov

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

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

Поступила в редакцию/Received 11.10.2021

Поступила после рецензирования/Revised 18.10.2021

Принята к публикации/Accepted 20.10.2021

УДК 004.056
doi:10.21685/2307-5538-2021-4-4

ПРОБЛЕМАТИКА ЭФФЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ СОБЫТИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

В. А. Селифанов¹, А. В. Ляшенко², В. В. Мартыненко³, М. А. Фролов⁴

^{1,2,3,4} АО «Российские космические системы», Москва, Россия

¹selifanov.va@spacecorp.ru, ²lyashenko.av@spacecorp.ru, ³martynenko.vv@spacecorp.ru, ⁴frolov.ma@spacecorp.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При проектировании систем защиты информации важно организовать процесс управления инцидентами информационной безопасности (ИБ) максимально эффективным образом. Целью данной статьи является анализ проблематики эффективной оценки событий ИБ. *Материалы и методы.* Для проведения полноценного анализа в статье рассматривается отечественная и международная нормативно-методическая база в области управления событиями ИБ в ракетно-космической отрасли, а именно: государственные стандарты (ГОСТ Р) и международные стандарты ISO/IEC. Кратко описаны существующие модели управления событиями ИБ, такие как PDCA и PICERL. Для предотвращения возможных проблем оценки событий ИБ в ракетно-космической отрасли анализируется важность использования в информационных системах SIEM-решений, а также применяемые для этого методы настройки корреляции событий в SIEM-системах. *Результаты.* Ключевыми выводами являются следующие: отсутствует единая общепринятая методика, позволяющая построить унифицированную модель управления инцидентами в ракетно-космической отрасли; существующие модели построения процессов управления событиями ИБ в полной мере не описывают нюансы настройки технических решений, предназначенных для централизованного управления событиями ИБ, и не позволяют обеспечить оперативное реагирование на возможные инциденты ИБ, их обработку и разрешение последствий таких инцидентов в информационной системе в ракетно-космической отрасли. Результатом работы является определение и формулировка ключевых проблем управления событиями ИБ в ракетно-космической отрасли, возникающих при построении и эксплуатации систем защиты.

Ключевые слова: информационная безопасность, ракетно-космической отрасли, события ИБ, SIEM-система, PDCA, PICERL

Для цитирования: Селифанов В. А., Ляшенко А. В., Мартыненко В. В., Фролов М. А. Проблематика эффективной оценки событий информационной безопасности в ракетно-космической отрасли // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 32–40. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-4

PROBLEMS OF EFFECTIVE ASSESSMENT OF INFORMATION SECURITY EVENTS IN THE ROCKET AND SPACE INDUSTRY

V.A. Selifanov¹, A.V. Lyashenko², V.V. Martynenko³, M.A. Frolov⁴

^{1,2,3,4} Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russia

¹selifanov.va@spacecorp.ru, ²lyashenko.av@spacecorp.ru, ³martynenko.vv@spacecorp.ru, ⁴frolov.ma@spacecorp.ru

Abstract. *Background.* The organization of the information security incident management process is a very important aspect of the information security system design. The objective of the research was to analyze problems of effective assessment of information security events. *Materials and methods.* In the theoretical part of the article analyzed international and Russian standards in the field of information security event management. For example, Russian GOST or international ISO/IEC. The article described such incident management models as PDCA and PICERL. The study proved the importance of using SIEM-solutions in information systems and methods for setting up event correlation. *Results.* The key thesis of this article are: there is no generally accepted method of incident management; models for building information security event management processes don't describe the nuances of configuring technical solutions and don't provide a quick response, analysis and resolution of information security incidents. The results of the study show the main problems of effective assessment of information security events.

Keywords: information security, rocket and space industry, information security events, SIEM-system, PDCA, PICERL

For citation: Selifanov V.A., Lyashenko A.V., Martynenko V.V., Frolov M.A. Problems of effective assessment of information security events in the rocket and space industry. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):32–40. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-4

Введение

В связи с ежегодным увеличением мирового информационного пространства, объемов данных и усложнением глобальной архитектуры информационных систем растут и требования к системам защиты информации в ракетно-космической отрасли (РКО). Для получения максимально подробных данных о событиях информационной безопасности (ИБ), произошедших в информационной системе, необходима их агрегация из различных источников, таких как средства антивирусной защиты, журналы событий средств защиты, DLP-системы в части контроля действий всех пользователей и сканеры уязвимостей и т.д. Усложнение it-инфраструктуры в ракетно-космической отрасли влечет за собой увеличение числа событий ИБ, которые, в свою очередь, нуждаются в анализе и управлении, что невозможно без создания эффективной модели управления инцидентами ИБ в указанной отрасли¹.

Существующие стандарты

При проектировании систем защиты информации, а также построении модели управления событиями ИБ необходимо опираться как на отечественную нормативную базу, так и на международные стандарты.

К государственным стандартам России (ГОСТ Р), регламентирующим вопросы управления событиями ИБ, относятся:

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2006. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента ИБ. Требования.

Это основополагающий стандарт, устанавливающий требования к системам менеджмента ИБ, а также к процессу управления инцидентами. Данный документ рекомендует использование процессного подхода при организации системы менеджмента. Он заключается в том, что всю деятельность, функционирующую в организации, необходимо рассматривать как процесс. Для этого в стандарте вводится модель «Планирование (Plan) – Осуществление (Do) – Проверка (Check) – Действие (Act)» (PDCA), используемая для структурирования процессов, влияющих на функционирование организации в целом².

Преимуществами этой модели является то, что произошедшие в информационной системе события и инциденты ИБ обрабатываются эффективным образом, особенно в части их классификации за счет тщательного анализа нежелательных происшествий минимизируются последствия от их повторного появления и ускоряется реакция по их предотвращению.

2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 18044–2007. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент инцидентов ИБ. Текущий стандарт предлагает использование структурного и планового подхода к реагированию на инциденты ИБ и построению менеджмента инцидентов в целом. Большое внимание уделяется этапам менеджмента инцидентов ИБ, соответствующим процессам модели PDCA.

3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002–2012. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил менеджмента ИБ. Текущий стандарт описывает ключевые меры и средства обеспечения ИБ информационной системы, в том числе защиту документов и данных компании, распределение обязанностей сотрудников, обучение персонала в области ИБ, менеджмент уязвимостей, непрерывности бизнеса и инцидентов

¹ ГОСТ Р ИСО/ МЭК 18044–2007. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент инцидентов информационной безопасности.

² ГОСТ Р ИСО/ МЭК 27001–2006. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования.

ИБ, а также документирование политики ИБ¹. Также в стандарте уделяется особое внимание факту того, что не все, описываемые в документе средства, могут и должны быть применены в РКО.

4. Международные стандарты, описывающие порядок управления событиями ИБ, такие как ISO/IEC 27001:2013, ISO/IEC 27035:2011 и ISO/IEC 27002:2013, являются идентичными соответствующим отечественным стандартам в области управления информационными технологиями в целом, а также конкретизирующие область управления инцидентами ИБ. Проблема их использования путем перевода в отечественные заключается в том, что пока готовится и утверждается ГОСТ, международный документ может стать недействительным, поскольку произойдет его обновление². Это вносит дополнительные неясности в правовую базу. Более наглядно это представлено в табл. 1.

Таблица 1

Актуальность российских стандартов

Российский стандарт	Актуальность	Международный стандарт	Актуальность
ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2006	+	ISO/IEC 27001:2005	–
–	–	ISO/IEC 27001:2013	+
–	–	ISO/IEC 27001:2013/CD Amd 1	+
–	–	ISO/IEC 27001:2013/Cor 1:2014	+
–	–	ISO/IEC 27001:2013/Cor 2:2015	+
ГОСТ Р ИСО/МЭК 18044–2007	+	ISO/IEC 18044:2004	–
–	–	ISO/IEC 27035:2011	–
–	–	ISO/IEC 27035–1:2016	+
–	–	ISO/IEC 27035–2:2016	+
–	–	ISO/IEC 27035–3:2020	+
ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002–2012	+	ISO/IEC 27002:2005	–
–	–	ISO/IEC 27002:2013	+
–	–	ISO/IEC 27002:2013/COR 1:2014	+
–	–	ISO/IEC 27002:2013/COR 2:2015	+

Из табл. 1 можно сделать вывод о том, что многие международные стандарты были уже несколько раз перевыпущены. На примере ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002–2012 видно, что международный документ имеет несколько дополнений. Однако российская законодательная база не актуализирует российские стандарты под обновленные международные требования.

Помимо нормативных стандартов при анализе событий ИБ необходимо руководствоваться частными документами, разработанными на конкретную систему, а именно, моделью угроз и нарушителя безопасности информации и политикой информационной безопасности в РКО.

Существующие модели управления событиями ИБ

Основной моделью принятия решений, рассматриваемой в законодательной базе по управлению инцидентами, является модель PDCA (Plan-Do-Check-Act) или, как ее еще называют, модель Деминга – Шухарта.

Кратко действия, совершаемые на каждом этапе этой модели, представлены на рис. 1.

¹ ГОСТ Р ИСО/ МЭК 27002–2012. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил менеджмента ИБ.

² ISO/IEC 27035-1-2016 Information technology – Security techniques. Information security incident management – Part 1: Principles of incident management ; ISO/IEC 27035-2-2016 Information technology – Security techniques. Information security incident management – Part 2: Guidelines to plan and prepare for incident response ; ISO/IEC 27035-3-2020 Information technology – Security techniques. Information security incident management – Part 3: Guidelines for ICT incidents response operations ; ISO/IEC 27001:2013. Information technology – Security techniques – Information security management systems – Requirements ; ISO/IEC 27002:2013. Information technology – Security techniques – Code of practice for information security controls.

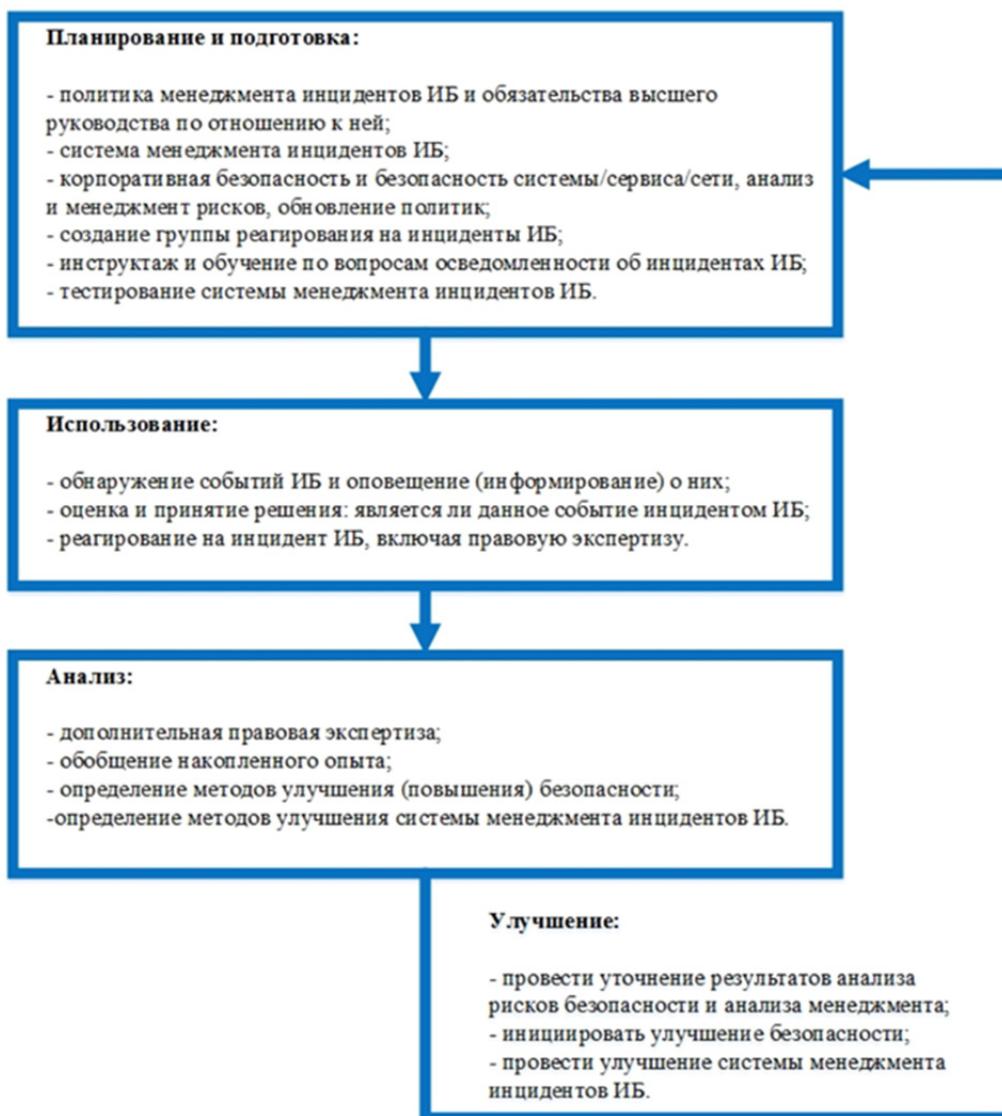


Рис. 1. Модель PDCA

Основной целью модели PDCA является обеспечение непрерывного, постоянного, циклического процесса улучшения системы реагирования на события и инциденты.

Минусами этой модели является трудность реализации данного процесса при отсутствии большого количества персонала, решающего только задачи управления инцидентами. Данная модель будет хорошо функционировать при наличии выделенного для менеджмента инцидента подразделения, с реализованной в нем эскалацией принятия решений в зависимости от приоритета инцидента ИБ в РКО.

Моделью, описывающей процесс реагирования на инциденты, является модель PICERL (Preparation – Identification – Eradication – Recovery – Lessons Learned).

Модель PICERL представляет собой жизненный цикл реагирования на события и инциденты ИБ. При построении процесса реагирования, основанного на приведенных в модели этапах, можно реализовать полноценный сценарий действий по управлению событиями. Минусами этой модели является то, что она ориентирована больше на построение процессов и организацию работ персонала, чем на управление техническими решениями.

Как видно из анализа, в реальных условиях при проектировании систем защиты использование только одной методики управления событиями ИБ в РКО недостаточно. Для эффективного анализа и построения системы управления событиями ИБ необходимо комбинирование существующих методик и выработка уникальных для каждой системы защиты метрик, позволяющих повысить точность обнаружения ключевых событий ИБ в РКО.



Рис. 2. Модель PICERL

Применяемые для управления событиями ИБ решения

При проектировании информационных систем в РКО невозможно применить глобальные комплексные решения, такие как например создание Security Operation Center (SOC). SOC решения включают в себя набор технических средств, автоматизированные процессы и большое количество задействованных человеческих ресурсов. Применение таких интегрированных решений невозможно вследствие отсутствия необходимости выделять такое количество ресурсов на менеджмент событий информационной безопасности в рамках одной системы, а также по большей части при проектировании систем ощущается существенная нехватка человеческих и финансовых ресурсов. Считается нецелесообразным уделять настолько большое внимание только одному аспекту защиты информации, поэтому при проектировании систем обычно считается достаточным применение только Security information and event management (SIEM) систем.

Применение SIEM-решений в первую очередь необходимо при проектировании критических информационных инфраструктур, а также при необходимости осуществления централизованного сбора событий при создании, например, государственных информационных систем.

SIEM-системы применяются для автоматизации процессов управления, для оперативной обработки данных о событиях безопасности, происходящих в системе, для осуществления централизованного сбора данных о произошедших событиях информационной безопасности.

Даже несмотря на максимальное упрощение шаблонов настроек и прозрачность функционирования применяемых решений, необходимо потратить достаточно много времени и задействовать много человеческих ресурсов для обеспечения должного уровня защищенности в РКО системы за счет применения в ней решений класса SIEM.

Для обеспечения эффективного функционирования SIEM-системы в РКО необходимо:

- провести анализ системы и определить особенности инфраструктуры, а также требования и рекомендации регулирующих организаций;
- определить список источников, которые необходимо подключить к SIEM-системе для решения поставленных задач;

- настроить автоматизированное реагирование системы в виде выполнения заданных скриптов, программ или задач при выявлении значимых отклонений показателей на этапе корреляции;
- настроить генерацию оповещений (уведомлений) о выявленных событиях ИБ;
- настроить визуализацию собираемых данных в виде диаграмм, помогающих идентифицировать аномалии или значимые отклонения, отличные от стандартного поведения систем. Так же визуализация включает в себя представление данных в виде отчетов;
- настроить хранение собранных данных в базе данных.

Методы настройки механизмов в SIEM-системах

Основными методами, применяемыми для настройки механизмов обнаружения событий безопасности, в SIEM-системах являются правила корреляции. Со стороны администратора, который производит настройки SIEM-систем, настройка правил корреляции, по большей части, выглядит как адаптация готовых шаблонов настроек под нужды конкретной системы.

Внутри шаблонных правил корреляции разработчиками используются типовые методы и алгоритмы, позволяющие обнаружить аномальное поведение системы (события и инциденты ИБ). Компании-разработчики SIEM решений полностью не раскрывают применяемые в их изделиях алгоритмы и методы. Однако базовые методы, которые являются основой для комбинации методик, применяемых в SIEM, известны.

Отличие между правилами корреляции заключается в использовании различных подходов к анализу состояния системы для формирования событий ИБ.

Существующие методы корреляции событий ИБ рассматривались во многих научных работах. В основу данной статьи легли работы [1, 2].

Ключевыми правилами корреляции, применяемыми для настройки правил реагирования системы на события, являются следующие:

- корреляция, основанная на сравнении событий безопасности;
- корреляция, основанная на базе знаний;
- статистическая корреляция.

Главными примерами корреляции, основанной на сравнении событий безопасности, являются:

- корреляция, основанная на правилах;
- корреляция, в основе которой лежит машинное обучение.

Основой корреляции на правилах является сбор (агрегация) событий из различных источников. Такими источниками могут быть: антивирус, DLP-системы, данные из мониторинга активности, IDS-системы и т.д. При появлении в системе типовых событий срабатывают правила, появление которых SIEM-система считает событием ИБ.

При использовании корреляции, в основе которой лежит машинное обучение, SIEM-система способна принимать решение об отнесении событий в системе к событиям ИБ на основе построения ветки деревьев решений.

Плюсом таких типов корреляции является простота понимания, а минусами – субъективность заданных правил, сформированных экспертом, неспособность системы автоматически обучаться на опыте применения правил и невозможность сохранять эффективность работы с правилами при появлении нестандартных ситуаций в системе.

Главными примерами корреляции, основанной на базе знаний, являются:

- корреляция, основанная на сценариях атак;
- корреляция на основе предпосылок наступления событий безопасности.

Корреляция, основанная на сценариях атак, предназначена для обнаружения многоступенчатых атак.

Корреляция на основе предпосылок наступления событий безопасности заключается в установке взаимосвязи между цепочками событий и возможными атаками на систему. Такая корреляция основывается на базе знаний, в которой содержится описание возможных предпосылок последствий наступления события ИБ.

Плюсами корреляции, основанной на базе знаний, является возможность определить первопричину возникновения события ИБ путем анализа начальных событий в цепочке. Ми-

нусами данного метода является то, что при одновременном возникновении в системе нескольких причин, повлекших за собой возникновение события ИБ, не всегда возможно будет выявить первопричину, повлекшую за собой появление такого события.

Основами статистической корреляции являются причинно-следственные связи, которые сохраняются после различных событий ИБ. Такие типы корреляции анализируют возникшие во время событий ИБ шаги атаки и обучаются с использованием статистического анализа данных.

Сравнение методов корреляции приведено в табл. 2 [1, 2].

Таблица 2

Сравнение методов корреляции

Характеристика метода	Корреляция, основанная на сравнении событий безопасности	Корреляция, основанная на базе знаний	Статистическая корреляция
Возможность сбора событий из различных источников	Да	Да	Нет
Необходимость в базе знаний	Да	Да	Нет
Обнаружение ложных событий	Да	Да	В зависимости от настроек
Обнаружение многоступенчатых атак	В зависимости от настроек	Да	В зависимости от настроек
Обнаружение новых атак	Да	Нет	Да
Вероятность ложных срабатываний	Средняя	Низкая	Высокая

При разработке правил не производится их тестирование на функционирующих в реальном времени системах. Вследствие недостаточности нагрузочных тестов частой проблемой является проблема совместимости правил с решениями, подключаемыми к SIEM.

Помимо этого, большинство правил настройки и приоритет реагирования на события ИБ все равно определяется экспертом. Нет научно обоснованной типовой методики, как выстраивать корреляцию событий и принимать решения при возникновении в системе событий ИБ в РКО таким образом, чтобы гарантированно выявлять все предпосылки по нарушениям режима безопасности и поиска первопричин произошедших событий.

Другой проблемой является недостаточная частота обновлений правил. Невозможно обеспечить оперативную доставку улучшений старых правил, добавление новых, а также их оперативную обработку в функционирующих системах.

Помимо вышесказанного разработчиками при внедрении в SIEM-системы правил не учитываются следующие нюансы РКО:

- количество подключаемых к системе средств, в том числе средств защиты информации;
- масштабы системы, в которую предполагается внедрение SIEM.

Заключение

В результате анализа существующей нормативно-методической базы по управлению инцидентами очевидно отсутствие общепринятой методики в РКО, позволяющей построить унифицированную модель управления инцидентами. Существующие модели построения процессов управления событиями ИБ в полной мере не описывают нюансы настройки технических решений, предназначенных для централизованного управления событиями ИБ в РКО. Научно-исследовательские работы и публикации в области управления инцидентами ИБ также не отвечают необходимым тенденциям и не позволяют обеспечить оперативное реагирование на возможные инциденты ИБ, их обработку и разрешение последствий таких инцидентов в информационной системе.

Это влечет за собой следующие проблемы при построении и эксплуатации систем защиты в РКО:

1. Выработка решений по большинству функций защиты производится человеком. Несмотря на интеграцию современных аппаратно-программных средств, в том числе SIEM-систем, процессы контроля инцидентов автоматизированы лишь частично. Необходимо ми-

нимизировать влияние человеческого фактора при принятии управляющих решений в части фильтрации происходящих в системе событий ИБ.

2. Отсутствие структурированного алгоритма обнаружения инцидентов может привести к несвоевременному реагированию на инциденты ИБ или, наоборот, к переизбытку поступающих в систему событий ИБ. Последствия таких настроек существенно замедляют скорость реакции на потенциальные инциденты ИБ, что негативно влияет на стойкость системы защиты к потенциальным атакам и критично сказывается на функционировании системы в целом.

3. Необходимость длительного анализа и выработки уникальных для каждой конкретной системы метрик, характеризующих ключевые показатели параметров инцидентов. Разработка унифицированных показателей и критериев оценки событий для обнаружения и идентификации инцидентов ИБ в РКО повысила бы эффективность управления событиями ИБ и ускорила бы разработку системы защиты в целом.

Исходя из всего вышесказанного, следует вывод, что необходима разработка и регламентация эффективной модели управления инцидентами, позволяющей систематизировать и скоординировать действия при анализе событий, расследовании, предотвращении и устранении причин и последствий инцидентов ИБ в системе РКО.

Список литературы

1. Москвичев А. Д., Долгачев М. В. Алгоритмы корреляции событий информационной безопасности // Автоматизация процессов управления. 2020. № 3. С. 50–59.
2. Новикова Е. С., Бекенева Я. А., Шоров А. В., Федотов Е. С. Обзор алгоритмов корреляции событий безопасности для обеспечения безопасности облачных вычислительных сред // Информационно-управляющие системы. 2017. № 5. С. 95–104.

References

1. Moskvichev A.D., Dolgachev M.V. Algorithms of correlation of information security events. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of management processes*. 2020;(3):50–59. (In Russ.)
2. Novikova E.S., Bekeneva Ya.A., Shorov A.V., Fedotov E.S. Review of algorithms for correlation of security events to ensure the security of cloud computing environments. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information management systems*. 2017;(5):95–104. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Алексеевич Селифанов

кандидат технических наук,
начальник сектора создания систем
передачи данных,
АО «Российские космические системы»
(Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53)
E-mail: selifanov.va@spacecorp.ru

Vladimir A. Selifanov

Candidate of technical sciences,
head of the sector for the creation
of data transmission systems,
Joint Stock Company "Russian Space Systems"
(53 Aviamotornaya, Moscow, Russia)

Антон Валерьевич Ляшенко

заместитель начальника отдела создания
систем обеспечения безопасности информации
и передачи данных НАКУ КА и ИКК,
АО «Российские космические системы»
(Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53)
E-mail: lyashenko.av@spacecorp.ru

Anton V. Lyashenko

Deputy head of the department for creating
information security systems and data transmission,
Joint Stock Company "Russian Space Systems"
(53 Aviamotornaya, Moscow, Russia)

Валентин Валентинович Мартыненко

начальник отдела создания систем
обеспечения безопасности информации
и передачи данных НАКУ КА и ИКК,
АО «Российские космические системы»
(Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53)
E-mail: martynenko.vv@spacecorp.ru

Valentin V. Martynenko

Head of the department for creating
information security systems and data transmission,
Joint Stock Company "Russian Space Systems"
(53 Aviamotornaya, Moscow, Russia)

Михаил Алексеевич Фролов

начальник центра создания наземных средств,
систем и комплексов НАКУ КА и ИКК,
АО «Российские космические системы»
(Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53)
E-mail: frolov.ma@spacecorp.ru

Michail A. Frolov

Head of the center for the creation
of ground facilities and complexes
Joint Stock Company "Russian Space Systems"
(53 Aviamotornaya, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.316.723.2

doi:10.21685/2307-5538-2021-4-5

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ ИМПЕДАНСА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ В ПРОЦЕССЕ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

П. Е. Голубков¹, Е. А. Печерская², О. В. Карпанин³,
Ю. А. Вареник⁴, В. С. Александров⁵, Г. В. Козлов⁶

^{1,2,3,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹golpavpnz@yandex.ru, ²pea1@list.ru, ³karpanino@mail.ru,

⁴yurik_ru@mail.ru, ⁵vsalexrus@gmail.com, ⁶gvk17@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки в процессе микродугового оксидирования. Для обеспечения гарантированной точности измерений активного и реактивного сопротивлений оксидных слоев в работе решена актуальная задача разработки и метрологического анализа измерительного преобразователя импеданса синтезируемых покрытий. Целью работы является получение аналитических выражений для функции преобразования и погрешностей канала измерения импеданса. *Материалы и методы.* Рассмотрено применение метода микродугового оксидирования применительно к модификации поверхности изделий из вентильных металлов и сплавов. Для достижения поставленной цели использованы методы функционального метрологического анализа, теоретической метрологии, электротехники. *Результаты.* Разработана структура измерительного преобразователя импеданса гальванической ячейки и проводимости электролита. Получено аналитическое описание комплексной проводимости гальванической ячейки. Выполнен функциональный и метрологический анализ измерительных каналов разработанного измерительного преобразователя, что позволило определить метрологические характеристики и оценить величину основной инструментальной погрешности. *Выводы.* Благодаря возможности измерения импеданса гальванической ячейки и проводимости электролита разработанный измерительный преобразователь может применяться не только для неразрушающего контроля процесса микродугового оксидирования на производстве, но и в научных исследованиях. Полученные в ходе метрологического анализа выражения для расчета функций преобразования и погрешностей измерительных каналов преобразователя позволяют гарантировать высокую точность измерения.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки, метрологический анализ, функция преобразования, погрешность измерения

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-08-00425.

Для цитирования: Голубков П. Е., Печерская Е. А., Карпанин О. В., Вареник Ю. А., Александров В. С., Козлов Г. В. Метрологический анализ канала измерения импеданса гальванической ячейки в процессе микродугового оксидирования // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 41–50. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-5

METROLOGICAL ANALYSIS OF THE CHANNEL FOR MEASURING THE IMPEDANCE OF A GALVANIC CELL IN THE PROCESS MICRO-ARC OXIDATION

P.E. Golubkov¹, E.A. Pecherskaya², O.V. Karpanin³,
Yu.A. Varenik⁴, V.S. Aleksandrov⁵, G.V. Kozlov⁶

^{1,2,3,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia

¹golpavpnz@yandex.ru, ²pea1@list.ru, ³karpanino@mail.ru,
⁴yurik_ru@mail.ru, ⁵vsalexrus@gmail.com, ⁶gvk17@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is a measuring converter of the impedance of a galvanic cell in the process of micro-arc oxidation. To ensure guaranteed accuracy of measurements of the active and reactive resistances of oxide layers, the actual problem of developing and metrological analysis of the impedance measuring converter of synthesized coatings is solved. The aim of the work is to obtain analytical expressions for the conversion function and errors of the impedance measurement channel. *Materials and methods.* The application of the micro-arc oxidation method is considered in relation to the modification of the surface of products made of valve metals and alloys. To achieve this goal, the methods of functional metrological analysis, theoretical metrology, and electrical engineering were used. *Results.* The structure of the measuring converter of the impedance of the galvanic cell and the conductivity of the electrolyte is developed. An analytical description of the complex conductivity of a galvanic cell is obtained. A functional and metrological analysis of the measuring channels of the developed measuring converter was performed, which made it possible to determine the metrological characteristics and estimate the value of the main instrumental error. *Conclusions.* Due to the possibility of measuring the impedance of the galvanic cell and the conductivity of the electrolyte, the developed measuring converter can be used not only for non-destructive testing of the MDO process in production, but also in scientific research. The expressions obtained during the metrological analysis for calculating the conversion functions and errors of the measuring channels of the converter allow us to guarantee high measurement accuracy.

Keywords: micro-arc oxidation, galvanic cell impedance converter, metrological analysis, conversion function, measurement error

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the RFBR, project No. 19-08-00425.

For citation: Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Varenik Yu.A., Aleksandrov V.S., Kozlov G.V. Metrological analysis of the channel for measuring the impedance of a galvanic cell in the process micro-arc oxidation. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):41–50. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-5

Введение

Микродуговое оксидирование (МДО) является одним из наиболее востребованных способов поверхностной плазменно-электролитической обработки изделий из вентильных металлов и сплавов. Высокие эксплуатационные характеристики получаемых оксидных слоев, сопоставимые со свойствами корундовой керамики, экологичность и безопасность процесса синтеза покрытий дают технологии МДО значительное преимущество перед анодированием, в том числе твердым [1], и позволяют говорить о возможном применении МДО-покрытий во многих отраслях промышленности, в том числе автомобильной, авиационной, ракетно-космической и оборонной, а также в медицине [2–6].

В настоящее время технология МДО находится на стадии становления: появляются новые режимы обработки, расширяется номенклатура обрабатываемых материалов [7], углубляются теоретические представления, лежащие в основе механизмов роста оксидных слоев. Как следствие, на производстве возникают сложности, проявляющиеся в неповторяемости свойств получаемых покрытий, вызванные недостаточной изученностью процесса МДО и несовершенством технологического оборудования. Анализ литературных данных показывает [8], что большинство существующих установок МДО не предполагает измерение свойств синтезируемых покрытий во время их формирования (оно производится только на готовых образцах), что ограничивает возможности управления, так как неизвестны значения текущих характеристик объекта исследования, например, толщины покрытия. Исключение составляют

установки [9–11], реализующие косвенное измерение толщины и пористости покрытия на основе определения параметров эквивалентной электрической схемы гальванической ячейки и/или анализа переходных процессов при подаче высоковольтных прямоугольных импульсов заданной частоты и скважности, однако данные устройства имеют низкую точность (относительная погрешность измерения параметров эквивалентной схемы либо толщины и пористости покрытия составляет от 3 до 10 %), что говорит о необходимости разработки высокоточных средств косвенного измерения параметров оксидных слоев в процессе МДО. В частности, перспективным является измерение импедансных спектров гальванической ячейки, которое позволяет определить не только электрофизические параметры покрытия, но и получить информацию о физико-химических процессах, происходящих в системе «анод-покрытие-катод». Данная статья посвящена разработке структуры измерительного преобразователя импеданса гальванической ячейки МДО и обеспечению его гарантированной точности.

Материалы и методика

Разработка структуры измерительного преобразователя импеданса, а также вывод аналитической модели измеряемой величины (комплексной проводимости гальванической ячейки) осуществлялись с помощью методов теоретической электротехники. Функциональный и метрологический анализ измерительных каналов разработанного измерительного преобразователя выполнялся по методике, изложенной в работе [12].

Результаты

Измерительный преобразователь импеданса (рис. 1) состоит из генератора, измерительной цепи, повторителя на операционном усилителе и АЦП. Особенностью конструкции является наличие усилителя тока в составе генератора, что позволяет исследовать низкоомные образцы (в верхней границе частотного диапазона реактивное сопротивление гальванической ячейки составляет сотни Ом), а также возможность переключения объектов измерения и образцовых мер, что позволяет измерять не только импеданс МДО-покрытия, но и проводимость электролита. Измерительной цепью является делитель напряжения, в верхнем плече которого находится исследуемый образец, а в нижнем – образцовая мера импеданса. Исследуемым образцом может быть гальваническая ячейка либо два дополнительных электрода, погруженных в электролит. Образцовая мера может быть внутренней и внешней и представляет собой RC-цепь; структура внутренней образцовой меры показана на рис. 2; структура внешней образцовой меры может быть любой.

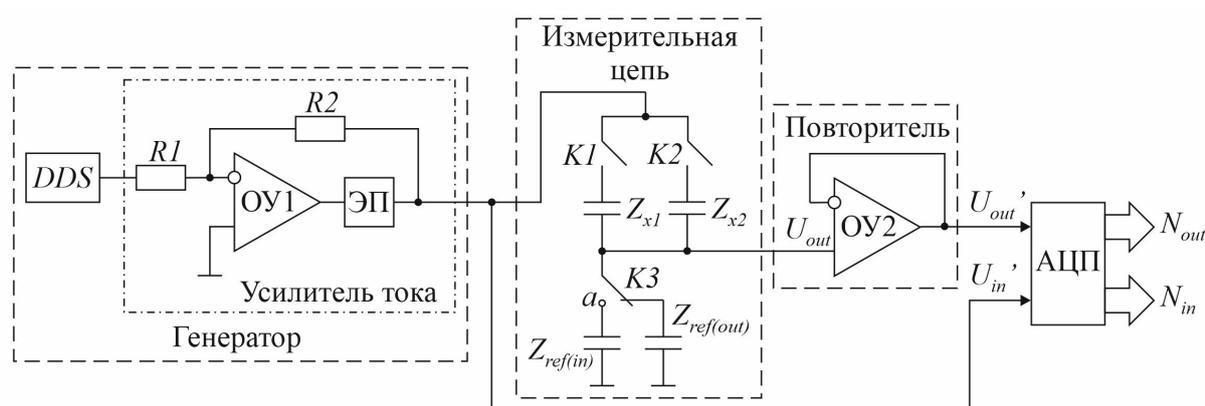
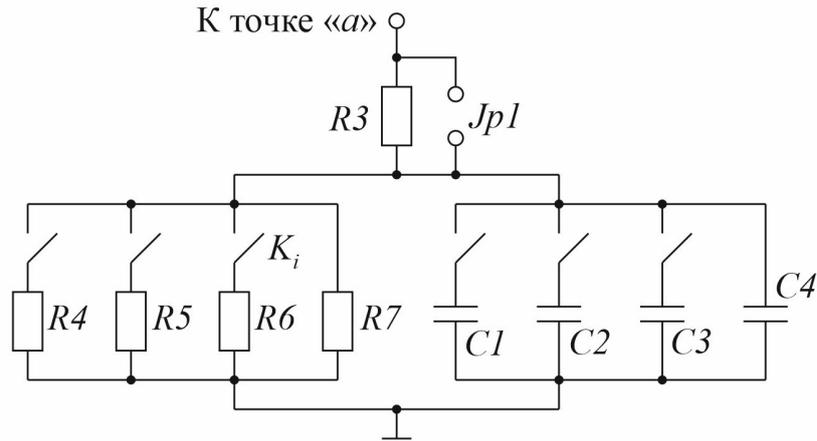


Рис. 1. Структура измерительного преобразователя импеданса

Для измерения импеданса разработан многочастотный модернизированный метод амперметра-вольтметра. Входной измерительный синусоидальный сигнал подается с генератора на измерительную цепь и на АЦП; выходной сигнал измерительной цепи после повторителя поступает на другой канал АЦП. Повторитель с высоким входным сопротивлением обеспечивает снижение погрешности согласования.

Рис. 2. Структура внутренней образцовой меры импеданса $Z_{ref(in)}$

Рассмотрим упрощенную схему измерительного преобразователя (рис. 3).

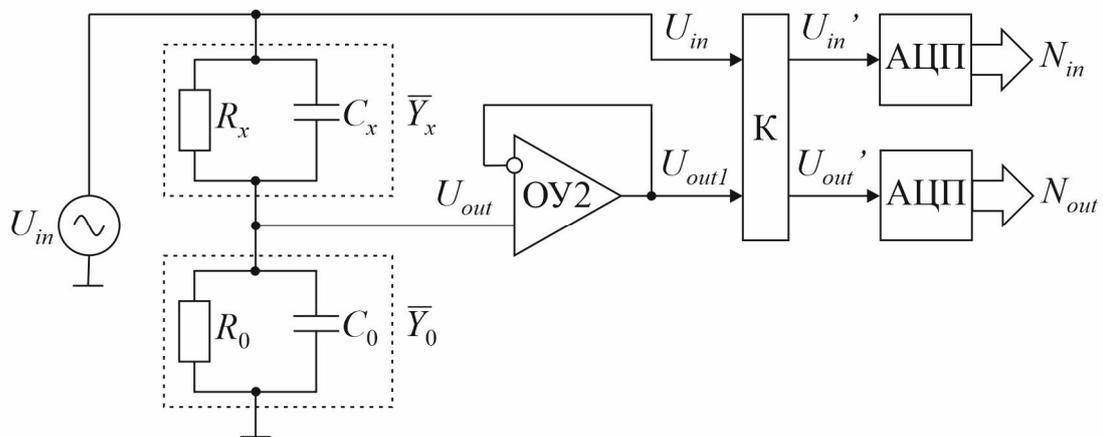


Рис. 3. Функция преобразования измерительного преобразователя импеданса:
К – коммутатор (мультиплексор) АЦП

Воспользовавшись формулой делителя напряжения, получим аналитическую функциональную модель измеряемой величины в виде

$$\bar{Y}_x = \bar{Y}_0 \frac{\bar{U}_{out}}{U_{in} - \bar{U}_{out}} = \bar{Y}_0 \bar{K}, \quad (1)$$

где \bar{Y}_x и \bar{Y}_0 – комплексная проводимость исследуемого образца и образцовой меры; \bar{U}_{in} и \bar{U}_{out} – входное и выходное напряжение измерительного преобразователя; \bar{K} – комплексный коэффициент (чувствительность):

$$\bar{K} = \text{Re}(\bar{K}) + j \cdot \text{Im}(\bar{K}), \quad (2)$$

$$\text{Re}(\bar{K}) = \frac{U_{in} U_{out} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - U_{out}^2}{U_{in}^2 + U_{out}^2 - 2U_{in} U_{out} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (3)$$

$$\text{Im}(\bar{K}) = \frac{U_{in} U_{out} \sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{U_{in}^2 + U_{out}^2 - 2U_{in} U_{out} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (4)$$

где $\text{Re}(\bar{K})$ и $\text{Im}(\bar{K})$ – действительная и мнимая часть коэффициента \bar{K} ; j – мнимая единица; U_{in} , φ_1 , U_{out} , φ_2 – модуль и аргумент входного и выходного напряжения соответственно. Под-

ставив (2) в (1), получим выражение для комплексной проводимости исследуемого образца в виде

$$Y_x = \operatorname{Re}(Y_x) + j \cdot \operatorname{Im}(Y_x) = [G_0 \operatorname{Re}(K) - B_0 \operatorname{Im}(K)] + j[G_0 \operatorname{Im}(K) + B_0 \operatorname{Re}(K)], \quad (5)$$

где G_0 и B_0 – активная и реактивная проводимость образцовой меры.

Структурная метрологическая модель измерительных каналов входного и выходного напряжения измерительного преобразователя импеданса показана на рис. 4,а и б, соответственно.

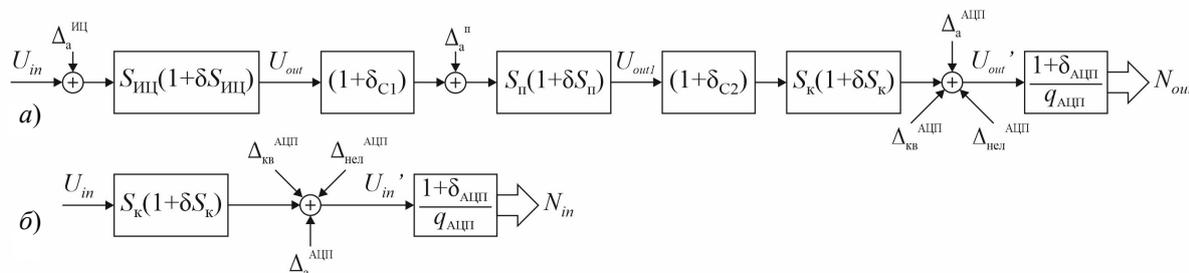


Рис. 4. Структурная метрологическая модель измерительного преобразователя импеданса: $S_{ИЦ}$, $S_{п}$, $S_{к}$, $\delta S_{ИЦ}$, $\delta S_{п}$, $\delta S_{к}$, $\Delta_a^{ИЦ}$, $\Delta_a^п$ – чувствительность измерительной цепи, повторителя и коммутатора, их мультипликативные и аддитивные погрешности; δ_{C1} , δ_{C2} – относительные погрешности согласования измерительной цепи с повторителем и повторителя с коммутатором; $q_{АЦП}$ и $\delta_{АЦП}$ – номинальная ступень квантования АЦП и ее относительная погрешность; $\Delta_a^{АЦП}$, $\Delta_{нел}^{АЦП}$, $\Delta_{кв}^{АЦП}$ – аддитивная, погрешность нелинейности и квантования АЦП соответственно

Полученные на основе данной модели функции преобразования входного и выходного напряжения, приведенные ко входу АЦП, соответственно имеют вид

$$U_{in}' = N_{in} q_{АЦП} = U_{in} S_{к}, \quad (6)$$

$$U_{out}' = N_{out} q_{АЦП} = U_{in} S_{ИЦ} S_{п} S_{к}, \quad (7)$$

где U_{in} – входное напряжение; U_{in}' и U_{out}' – выходное напряжение измерительных каналов; N_{in} и N_{out} – код АЦП, соответствующий входному и выходному напряжению; $q_{АЦП}$ – номинальная ступень квантования АЦП; $S_{ИЦ}$, $S_{п}$, $S_{к}$ – чувствительность измерительной цепи, повторителя и коммутатора соответственно.

Оценим погрешности измерительных каналов. Для измерительного канала выходного напряжения сумма приведенных ко входу мультипликативных погрешностей $\delta_{мул}^{U_{out}}$ равна

$$\delta_{мул}^{U_{out}} = \sqrt{(\delta S_{ИЦ} \cdot A_1)^2 + (\delta_{C1} \cdot A_1)^2 + (\delta S_{п} \cdot A_2)^2 + (\delta_{C2} \cdot A_3)^2 + (\delta S_{к} \cdot A_3)^2 + (\delta_{АЦП} U_{in}')^2}, \quad (8)$$

$$A_1 = U_{in} S_{ИЦ} S_{п} S_{к}, \quad (9)$$

$$A_2 = U_{in} S_{п} S_{к}, \quad (10)$$

$$A_3 = U_{in} S_{к}, \quad (11)$$

где $A_1 - A_3$ – весовые коэффициенты; $\delta S_{ИЦ}$, $\delta S_{п}$, $\delta S_{к}$ – погрешности чувствительности измерительной цепи, повторителя и коммутатора соответственно; δ_{C1} , δ_{C2} – погрешности согласования измерительной цепи с повторителем и повторителя с коммутатором соответственно; $\delta_{АЦП}$ – относительная погрешность номинальной ступени квантования АЦП.

Сумма приведенных ко входу аддитивных погрешностей $\Delta_a^{U_{out}}$ равна

$$\Delta_a^{U_{out}} = \sqrt{(\Delta_a^{ИЦ} S_{ИЦ} S_{п} S_{к})^2 + \left(\frac{\Delta_a^п S_{п} S_{к}}{S_{ИЦ}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_a^{АЦП}}{S_{ИЦ} S_{п} S_{к}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{кв}^{АЦП}}{S_{ИЦ} S_{п} S_{к}}\right)^2}, \quad (12)$$

где $\Delta_a^{ИЦ}$, $\Delta_a^п$ – аддитивные погрешности измерительной цепи и повторителя; $\Delta_a^{АЦП}$, $\Delta_{кв}^{АЦП}$ – аддитивная погрешность и погрешность квантования АЦП.

Приведенная ко входу погрешность нелинейности $\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{out}}}$ имеет вид

$$\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{out}}} = \frac{\Delta_{\text{нел}}^{\text{АЦП}}}{S_{\text{ИЦ}} S_{\text{П}} S_{\text{К}}}, \quad (13)$$

где $\Delta_{\text{нел}}^{\text{АЦП}}$ – погрешность нелинейности АЦП.

Аналогично для измерительного канала входного напряжения получим:

Сумма приведенных ко входу мультипликативных погрешностей

$$\delta_{\text{мул}}^{U_{\text{in}}} = \delta S_{\text{К}} U_{\text{in}} + \delta_{\text{АЦП}} U_{\text{in}}. \quad (14)$$

То же для аддитивных погрешностей:

$$\Delta_a^{U_{\text{in}}} = \frac{\Delta_a^{\text{АЦП}}}{S_{\text{К}}} + \frac{\Delta_{\text{КВ}}^{\text{АЦП}}}{S_{\text{К}}}. \quad (15)$$

Приведенная ко входу погрешность нелинейности:

$$\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{in}}} = \frac{\Delta_{\text{нел}}^{\text{АЦП}}}{S_{\text{К}}}. \quad (16)$$

Выражения для основной погрешности, приведенной ко входу измерительных каналов входного $\Delta_{\text{и}}^{U_{\text{in}}}$ и выходного напряжения $\Delta_{\text{и}}^{U_{\text{out}}}$, соответственно имеют вид

$$\Delta_{\text{и}}^{U_{\text{in}}} = \sqrt{(\Delta_a^{U_{\text{in}}})^2 + (\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{in}}})^2 + (\delta_{\text{мул}}^{U_{\text{in}}})^2}, \quad (17)$$

$$\Delta_{\text{и}}^{U_{\text{out}}} = \sqrt{(\Delta_a^{U_{\text{out}}})^2 + (\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{out}}})^2 + (\delta_{\text{мул}}^{U_{\text{out}}})^2}. \quad (18)$$

Погрешность согласования измерительной цепи с последующими звеньями описывается выражением

$$\delta S_{12}^Z = -\frac{Z_{\text{ref}}}{Z_{\text{ref}} + Z_{\text{inZ}}}, \quad (19)$$

где Z_{inZ} – входной импеданс повторителя:

$$Z_{\text{inZ}} = \left(\frac{1}{R_{\text{in}}} + \frac{1}{R_d + R_{\text{out}}} + j\omega C_{\text{in}} \right)^{-1}; \quad (20)$$

Z_{ref} – импеданс образцовой меры. Для двухэлементной RC-цепи Z_{ref} равен

$$Z_{\text{ref}} = \left[(R_{\text{ref}})^{-1} + j\omega C_{\text{ref}} \right]^{-1}. \quad (21)$$

В выражениях (20), (21) R_d , R_{in} , C_{in} и R_{out} – дифференциальное и синфазное входное сопротивление, входная емкость и выходное сопротивление операционного усилителя соответственно; R_{ref} и C_{ref} – номиналы компонентов образцовой меры.

Зависимость погрешности согласования от частоты измерительного сигнала показана на рис. 5. Видно, что при увеличении частоты погрешность согласования уменьшается, и на частотах выше 3 кГц стремится к нулю. Это объясняется тем, что образцовая мера, как и исследуемый образец, моделируется параллельной RC-цепью, реактивное сопротивление которой уменьшается с ростом частоты.

Зависимость погрешности согласования от величин R_{ref} и C_{ref} представлена на рис. 6. Форма кривых на рис. 6 зависит от соотношения активного и реактивного сопротивления образцовой меры. Для номинальных значений R_{ref} и C_{ref} , представленных на графике, реактивной составляющей в выражении (21) почти всегда можно пренебречь (за исключением случая, когда $R_{\text{ref}} = 10$ кОм и $C_{\text{ref}} = 0,1$ мкФ, когда активное и реактивное сопротивление сопоставимы),

как и импедансом Z_{ref} в знаменателе (19). Поэтому погрешность согласования уменьшается при увеличении сопротивления образцовой меры (рис. 6,а). Вид зависимости погрешности согласования от емкости C_{ref} объясняется аналогичным образом, за исключением того, что реактивным сопротивлением пренебрегать нельзя. Гораздо более важным является тот факт, что погрешность согласования составляет ничтожно малую величину по сравнению с требуемой инструментальной погрешностью измерительного преобразователя (0,5 %) благодаря наличию повторителя с высоким входным сопротивлением ($R_{in} = 10^{12}$ Ом).

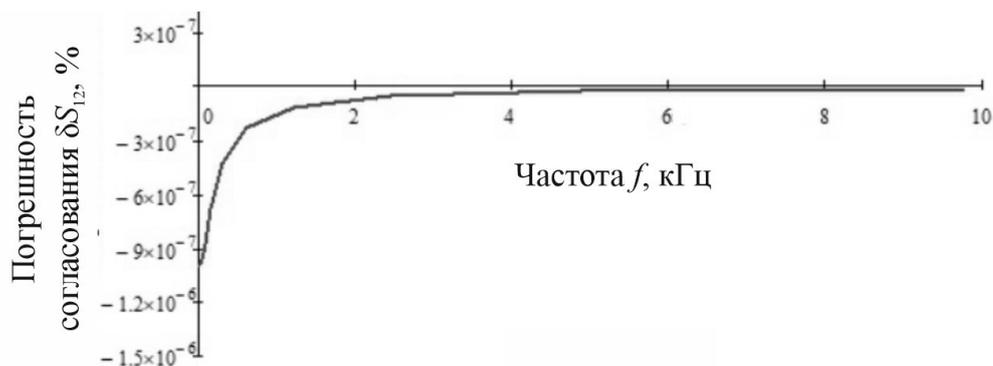


Рис. 5. Зависимость погрешности согласования от частоты измерительного сигнала

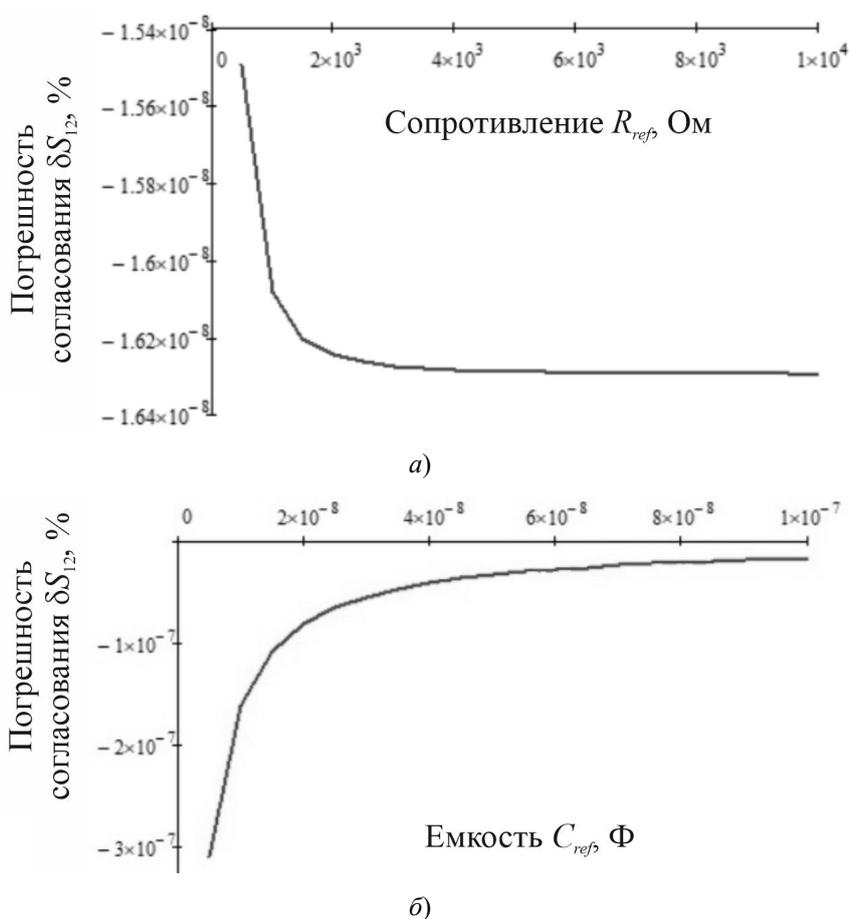


Рис. 6. Зависимость погрешности согласования от сопротивления (а) и емкости (б) образцовой меры

Проведенные метрологические испытания показали, что основная погрешность измерения импеданса с помощью разработанного измерительного преобразователя не превышает 0,5 %. Методика проведения метрологических испытаний будет изложена в следующих публикациях.

Заключение

Разработанный измерительный преобразователь позволяет измерять не только частотные зависимости импеданса гальванической ячейки, но и проводимости электролита, что открывает широкие возможности не только для контроля характеристик МДО покрытия, но и для исследования физико-химических явлений, сопровождающих рост оксидного слоя. Полученные в результате метрологического анализа выражения для расчета функций преобразования и погрешностей измерительных каналов преобразователя позволяют гарантировать высокую точность измерения импеданса гальванической ячейки и повысить достоверность получаемой измерительной информации.

Список литературы

1. Тихоненко В. В., Шкилько А. М. Метод микродугового оксидирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 2, № 13. С. 13–18.
2. Скрябин М. Л. Практические результаты поверхностного упрочнения днища поршня методом микродугового оксидирования // Ползуновский вестник. 2018. № 1. С. 153–157.
3. Кошуро В. А., Фомин А. А., Родионов И. В., Фомина М. А. Влияние микродугового оксидирования на структуру и твердость алюмооксидных покрытий, сформированных на титане плазменным напылением // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2018. Т. 54, № 5. С. 499–504.
4. Штокал А. О., Говорун Т. А., Баженова О. П., Шаталов В. К. Перспективы использования способов микродугового оксидирования поверхностей при создании теплозащитного экрана космического аппарата для исследования Солнца // Коррозия: материалы, защита. 2020. № 1. С. 28–34.
5. Воробьев И. С. Исследование противоосколочных свойств пористого литого алюминия, упрочненного методом микродугового оксидирования // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 9-10. С. 98–106
6. Голубков П. Е., Крайнова К. Ю., Сафронов М. И. [и др.]. Применение в изделиях медицинской техники покрытий, полученных методом микродугового оксидирования // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК-2019) : материалы VI Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (13 марта 2019 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. С. 184–186.
7. Cheng Y., Zhu Zh., Zhang Q. [et al.]. Plasma electrolytic oxidation of brass // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 385. P. 125366.
8. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Зинченко Т. О. Анализ модификаций технологических установок микродугового оксидирования // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК-2020) : материалы VII Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (18 марта 2020 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. С. 267–270.
9. Мамаев А. И., Мамаева В. А., Борицов В. Н., Дорофеева Т. И. Формирование наноструктурных неметаллических неорганических покрытий путем локализации высокоэнергетических потоков на границе раздела фаз : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2010. 360 с.
10. Bolshenko A. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Panenko I. N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices // Life Science Journal. 2014. Vol. 11 (1s). P. 263–268.
11. Парфенов Е. В., Фаррахов Р. Г., Мукаева В. Р. [и др.]. Автоматизированная технологическая установка для исследования электролитно-плазменных процессов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2016. Т. 20, № 4. С. 23–31.
12. Шлыков Г. П. Теория измерений: уравнения, модели, оценивание точности : учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. 100 с.

References

1. Tikhonenko V.V., Shkil'ko A.M. Method of microarc oxidation. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy = Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2012;2(13):13–18. (In Russ.)
2. Skryabin M.L. Practical results of surface hardening of the piston bottom by microarc oxidation method. *Polzunovskiy vestnik = Polzunovsky vestnik*. 2018;(1):153–157. (In Russ.)
3. Koshuro V.A., Fomin A.A., Rodionov I.V., Fomina M.A. The effect of microarc oxidation on the structure and hardness of aluminum oxide coatings formed on titanium by plasma spraying. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Physicochemistry of the surface and protection of materials*. 2018;54(5):499–504. (In Russ.)
4. Shtokal A.O., Govorun T.A., Bazhenova O.P., Shatalov V.K. Prospects of using methods of microarc oxidation of surfaces when creating a heat shield of a spacecraft for solar exploration. *Korroziya: materialy, zashchita = Corrosion: materials, protection*. 2020;(1):28–34. (In Russ.)

5. Vorob'ev I.S. Investigation of the anti-shattering properties of porous cast aluminum hardened by micro-arc oxidation. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu = Issues of defense technology. Ser. 16, Technical means of countering terrorism.* 2018;(9-10):98–106. (In Russ.)
6. Golubkov P.E., Kraynova K.Yu., Safronov M.I. [et al.]. Application of coatings obtained by microarc oxidation in medical equipment products. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK-2019): materialy VI Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (13 marta 2019 g.) = Information technologies in science and education. Problems and Prospects (VMNPC-2019) : materials of the VI Vsros. inter-university. Scientific and practical conference (March 13, 2019).* Penza: Izd-vo PGU, 2019:184–186. (In Russ.)
7. Cheng Y., Zhu Zh., Zhang Q. [et al.]. Plasma electrolytic oxidation of brass. *Surface and Coatings Technology.* 2020;385:125366.
8. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O. Analysis of modifications of technological installations of microarc oxidation. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK-2020): materialy VII Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (18 marta 2020 g.) = Information technologies in science and education. Problems and Prospects (VMNPC-2020) : materials of the VII Vsros. inter-university. nauch.-pract. Conf. (18 March 2020).* Penza: Izd-vo PGU, 2020:267–270. (In Russ.)
9. Mamaev A.I., Mamaeva V.A., Borikov V.N., Dorofeeva T.I. *Formirovanie nanostrukturnykh nemetallicheskikh neorganicheskikh pokrytiy putem lokalizatsii vysokoenergeticheskikh potokov na granitse razdela faz: ucheb. posobie = Formation of nanostructured inorganic non-metallic coatings by the localization of high-energy fluxes at the interface of phases : textbook.* Tomsk: Izd-vo Tomsk. un-ta, 2010:360. (In Russ.)
10. Bolshenko A.V., Pavlenko A.V., Puzin V.S., Panenko I.N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices. *Life Science Journal.* 2014;11(1s):263–268.
11. Parfenov E.V., Farrakhov R.G., Mukaeva V.R. [et al.]. Automated process unit for the study of electrolytic-plasma processes. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University.* 2016;20(4):23–31. (In Russ.)
12. Shlykov G.P. *Teoriya izmereniy: uravneniya, modeli, otsenivanie tochnosti: ucheb. posobie = Measurement theory: equations, models, accuracy estimation : textbook.* Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2008:100. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Евгеньевич Голубков

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

Pavel E. Golubkov

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

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Олег Валентинович Карпанин

старший преподаватель кафедры информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: karpanino@mail.ru

Oleg V. Karpanin

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

Юрий Александрович Вареник

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

Yuriy A. Varenik

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

Владимир Сергеевич Александров

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

Vladimir S. Alexandrov

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

Геннадий Васильевич Козлов

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gvk17@yandex.ru

Gennady V. Kozlov

Doctor of technical sciences, professor,
director of the polytechnic institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 21.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 28.08.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

УДК 621.316.723.2
doi:10.21685/2307-5538-2021-4-6

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИМПЕДАНСА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

П. Е. Голубков¹, Е. А. Печерская², О. А. Мельников³,
О. В. Карпанин⁴, В. С. Александров⁵, Ю. А. Вареник⁶

^{1,2,3,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ golpavpnz@yandex.ru, ² pea1@list.ru, ³ oleg-068@mail.ru,
⁴ karpanino@mail.ru, ⁵ vsalexrus@gmail.com, ⁶ yurik_ru@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Метод микродугового оксидирования позволяет получить защитные покрытия на изделиях из металлов вентильной группы, применяемых в различных отраслях. Для синтеза покрытий с заданными свойствами требуется выполнение измерений их электрофизических параметров с гарантированной точностью. Объектом исследования выступает измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки и проводимости электролита в процессе микродугового оксидирования. Цель исследования – достижение требуемых характеристик точности измерительного преобразователя импеданса путем разработки методики и проведения метрологических испытаний. *Материалы и методы.* Метрологические испытания измерительного преобразователя проводились экспериментально с использованием автоматизированной установки микродугового оксидирования «МДОлаб», а также высокоточного LCR-метра WK6430B методом замещения. В силу особенностей программного обеспечения установки «МДОлаб» измеряемый импеданс пересчитывался в сопротивление и емкость эквивалентной параллельной RC-цепи. Для эксперимента изготовлены образцовые меры импеданса, получены выражения для расчета их сопротивления и емкости. Разработана методика метрологических испытаний, которая предполагает введение поправочного коэффициента для исключения систематической погрешности измерительного преобразователя. *Результаты.* В результате применения предложенной методики метрологических испытаний систематическая погрешность измерения сопротивления и емкости была минимизирована и составила не более 0,02 %; основная относительная погрешность измерения сопротивления и емкости составила не более 0,5 %, что соответствует заявленным требованиям. *Выводы.* Предложенная методика метрологических испытаний позволяет достичь требуемой точности измерения импеданса гальванической ячейки, что говорит о ее эффективности. Разработанный измерительный преобразователь может быть использован для исследования и контроля процесса микродугового оксидирования и электрофизических параметров синтезируемых покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки, методика метрологических испытаний, повышение точности

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-08-00425.

Для цитирования: Голубков П. Е., Печерская Е. А., Мельников О. А., Карпанин О. В., Александров В. С., Вареник Ю. А. Метрологические испытания измерительного преобразователя импеданса гальванической ячейки микродугового оксидирования // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 51–59. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-6

METROLOGICAL TESTS OF A MICRO-ARC OXIDATION GALVANIC CELL IMPEDANCE

P.E. Golubkov¹, E.A. Pecherskaya², O.A. Mel'nikov³,
O.V. Karpanin⁴, V.S. Aleksandrov⁵, Yu.A. Varenik⁶

^{1,2,3,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia
¹ golpavpnz@yandex.ru, ² pea1@list.ru, ³ oleg-068@mail.ru,
⁴ karpanino@mail.ru, ⁵ vsalexrus@gmail.com, ⁶ yurik_ru@mail.ru

Abstract. *Background.* The method of micro-arc oxidation allows to obtain protective coatings on products made of metals of the valve group used in various industries. For the synthesis of coatings with specified properties, it is necessary to perform measurements of their electrophysical parameters with guaranteed accuracy. The object of the study is a measuring converter of the impedance of a galvanic cell and the conductivity of an electrolyte in the process of microarc oxidation. The purpose of the study: to achieve the required accuracy characteristics of the impedance measuring converter by developing a methodology and conducting metrological tests. *Materials and methods.* Metrological tests of the measuring converter were carried out experimentally using an automated micro-arc oxidation unit «MDOLab», as well as a high-precision LCR meter WK6430B by substitution method. Due to the features of the MDOLab installation software, the measured impedance was converted into the resistance and capacitance of an equivalent parallel RC circuit. For the experiment, model impedance measures were made, expressions for calculating their resistance and capacitance were obtained. A method of metrological tests has been developed, which involves the introduction of a correction factor to eliminate the systematic error of the measuring converter. *Results.* As a result of the application of the proposed methodology of metrological tests, the systematic error in measuring resistance and capacitance was minimized and amounted to no more than 0.02 %; the main relative error in measuring resistance and capacitance was no more than 0.5 %, which meets the stated requirements. *Conclusions.* The proposed method of metrological tests allows achieving the required accuracy of measuring the impedance of a galvanic cell, which indicates its effectiveness. The developed measuring converter can be used to study and control the process of micro-arc oxidation and the electrophysical parameters of the synthesized coatings.

Keywords: micro-arc oxidation, galvanic cell impedance measuring converter, metrological testing methodology, accuracy improvement

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the RFBR, project No. 19-08-00425.

For citation: Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Mel'nikov O.A., Karpanin O.V., Aleksandrov V.S., Varenik Yu.A. Metrological tests of a micro-arc oxidation galvanic cell impedance. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):51–59. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-6

Введение

Автоматизация технологических процессов как один из важнейших элементов современного производства невозможна без измерения и контроля различных физических величин, характеризующих состояние готового изделия или условия его формирования. Однако для новых технологий, к которым относится микродуговое окисление (МДО), довольно сложно разработать средства измерений, удовлетворяющие всем предъявляемым требованиям. Например, в настоящее время для исследования свойств (толщины, микротвердости, пористости и т.п.) покрытий, формируемых МДО, используют готовые синтезированные образцы [1, 2], что не позволяет изучить фундаментальные закономерности физических явлений, сопровождающих рост оксидного слоя. Для решения данной проблемы разрабатывается исследовательское и технологическое оборудование; известны, например программно-аппаратные комплексы МДО [3, 4], созданные научными коллективами А. И. Мамаева и А. В. Большенко, которые позволяют определить толщину и пористость МДО-покрытий на основе эквивалентной электрической схемы гальванической ячейки, анализа кривых поляризации напряжения и тока и токовой характеристики переходного процесса. Также довольно интересен метод импедансной спектроскопии, позволяющий не только измерить электрофизические параметры МДО-покрытий, но и исследовать физико-химические аспекты их синтеза. Например, разработанная в работе [5] автоматизированная установка электролитно-плазменной обработки использует данный метод для определения толщины МДО-покрытий по импедансным спектрам с помощью нейронных сетей. Недостатком рассмотренных устройств является низкая точность.

Авторами разработан измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки и проводимости электролита в процессе МДО и проведен его функциональный и метрологический анализ. В данной работе рассмотрена методика метрологических испытаний данного преобразователя, которая позволит подтвердить его высокую точность.

Материалы и методика

Метрологические испытания измерительного преобразователя проводились экспериментально с помощью разработанной авторами лабораторной установки «МДОлаб» (рис. 1) [6], которая позволяет получать МДО-покрытия и реализует предложенный метод измерения

импеданса. В силу особенностей программного обеспечения импеданс исследуемого образца на выходе измерительного преобразователя представляется в виде сопротивления и емкости эквивалентной параллельной RC -цепи, поэтому в ходе метрологических испытаний контролировалась точность измерения сопротивления и емкости по двум образцовым мерам, структура которых показана на рис. 2. Образцовая мера № 2 имеет сложную структуру: два параллельных звена $R_{p1}-C_{p1}$ и $R_{p2}-C_{p2}$ имитируют импеданс барьерного и пористого слоев покрытия, а резистор R_{p3} – активное сопротивление электролита. Такая структура в отличие, например, от лестничной схемы [7] более наглядна и удобна для анализа, так как имеет две четко различимые постоянные времени.

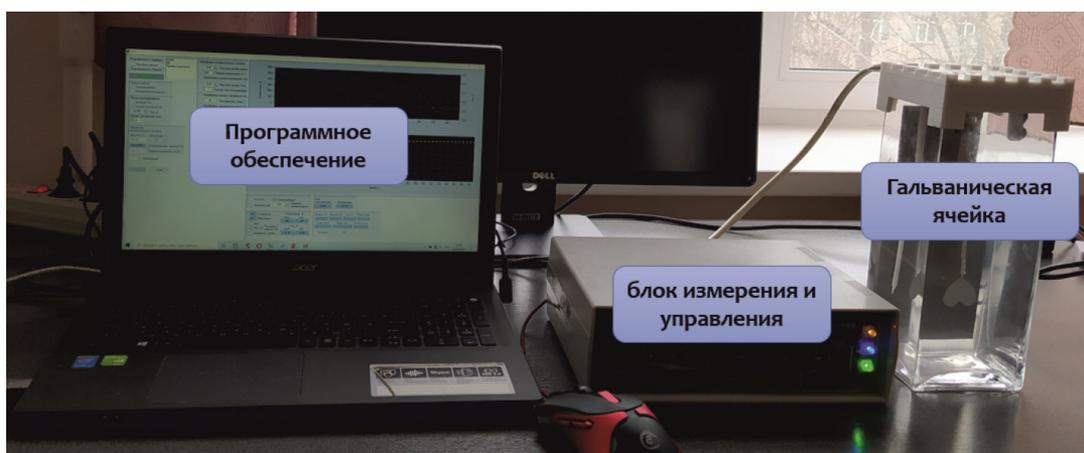


Рис. 1. Установка «МДОлаб»

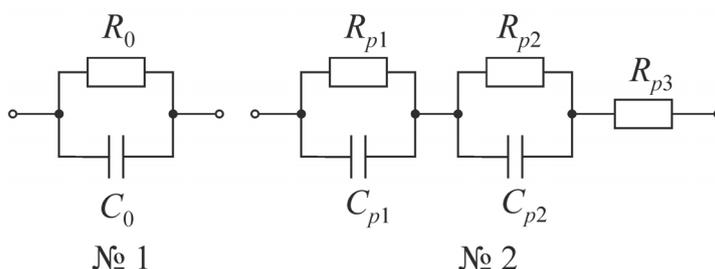


Рис. 2. Структура образцовых мер импеданса: R_0, C_0 – сопротивление и емкость покрытия; $R_{p1}, C_{p1}, R_{p2}, C_{p2}$ – сопротивление и емкость барьерного и пористого слоев покрытия; R_{p3} – сопротивление электролита

Метрологические испытания измерительного преобразователя проводились методом замещения, при котором вместо гальванической ячейки подключали образцовую меру с известным импедансом, по следующей методике:

1. Измерить точные значения номиналов компонентов образцовых мер высокоточным LCR -метром $WK6430B$ (основная погрешность не превышает 0,02 %).

2. Для образцовой меры № 2: выполнить пересчет номиналов компонентов в сопротивление и емкость параллельной RC -цепи методом преобразования эквивалентных электрических схем (рис. 3) для 10 частот в диапазоне от 20 Гц до 10 кГц по выражениям

$$R_p = \frac{1}{\omega^2 C_s^2 R_s} + R_s, \quad (1)$$

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2}, \quad (2)$$

$$R_s = R_{s1} + R_{s1} + R_{p3} = \frac{R_{p1}}{1 + \omega^2 C_{p1}^2 R_{p1}^2} + \frac{R_{p2}}{1 + \omega^2 C_{p2}^2 R_{p2}^2} + R_{p3}, \quad (3)$$

$$C_s = \left(\frac{1}{C_{s1}} + \frac{1}{C_{s2}} \right)^{-1} = \left(\frac{\omega^2 C_{p1} R_{p1}^2}{1 + \omega^2 C_{p1}^2 R_{p1}^2} + \frac{\omega^2 C_{p2} R_{p2}^2}{1 + \omega^2 C_{p2}^2 R_{p2}^2} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где R_p и C_p – сопротивление и емкость эквивалентной параллельной RC -цепи; $R_0, R_{p1}, R_{p2}, R_{p3}, C_0, C_{p1}, C_{p2}$ – номиналы компонентов образцовых мер; ω – циклическая частота.

3. Измерить 20 значений сопротивления R_i и емкости C_i образцовой меры в диапазоне частот (i – порядковый номер частоты), подключив ее вместо гальванической ячейки к установке «МДОлаб».

4. Определить вид закона распределения случайной величины по критерию согласия Пирсона (критерий χ^2) для сопротивления и емкости на одной частоте по методике, изложенной, например, в работе [8]. Для остальных частот принять аналогичный характер распределения.

5. Провести статистическую обработку полученных в п. 3 данных. Определить матожидание m_i^R, m_i^C , дисперсию D_i^R, D_i^C и среднеквадратическое отклонение (СКО) σ_i^R, σ_i^C сопротивления R и емкости C для каждой i -й частоты диапазона с учетом вида закона распределения.

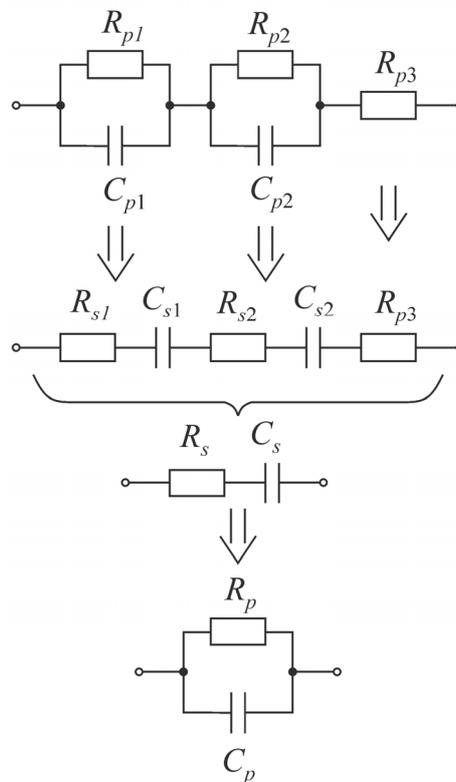


Рис. 3. Расчет комплексной проводимости образцовой меры № 2

6. Определить абсолютную Δ_i^X и относительную δ_i^X систематическую погрешность измерения сопротивления и емкости на каждой частоте по формулам

$$\Delta_i^X = m_i^X - (X_p)_i, \quad (5)$$

$$\delta_i^X = \frac{\Delta_i^X}{m_i^X}, \quad (6)$$

где X – измеряемая величина (R или C); m_i^X – матожидание; X_p – точные значения сопротивления и емкости образцовых мер, полученные в п. 1 или 2 (в зависимости от образцовой меры).

7. Определить доверительный интервал случайной погрешности измерения сопротивления и емкости:

$$X_i = m_i^X \pm t_{\alpha, \nu} \sigma_i^X, \quad (7)$$

где σ_i^X – СКО; $t_{\alpha, \nu}$ – коэффициент Стьюдента (для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и 20 наблюдений $t_{\alpha, \nu} = 2,086$ [9]).

8. Исключить систематическую погрешность, умножив значения сопротивления и емкости, полученные в п. 3, на поправочный коэффициент k_i^X для каждой частоты:

$$X_i^* = X_i \cdot k_i^X = X_{изм} \cdot (1 - \delta_i^X), \quad (8)$$

где X_i^* – уточненные значения сопротивления и емкости.

9. Вычислить уточненные значения математического ожидания m_i^{X*} , дисперсии D_i^{X*} и СКО σ_i^{X*} для выборок, полученных в п. 10.

10. Оценить неисключенные остатки систематической погрешности в абсолютном Δ_i^{X*} и относительном δ_i^{X*} виде по формулам

$$\Delta_i^{X*} = m_i^{X*} - (X_p)_i, \quad (9)$$

$$\delta_i^{X*} = \frac{\Delta_i^{X*}}{m_i^{X*}}. \quad (10)$$

Определить интервалы $[-\Delta_i^{R*}, +\Delta_i^{R*}]$ и $[-\Delta_i^{C*}, +\Delta_i^{C*}]$, в которых находятся предельные значения неисключенных остатков систематической погрешности измерения сопротивления и емкости.

11. Аналогично (7) найти доверительный интервал случайной погрешности для уточненных значений сопротивления и емкости.

12. Оценить предельные значения случайной погрешности измерений сопротивления Δ_i^{oR} и емкости Δ_i^{oC} для каждой частоты, пользуясь правилом трех сигм.

13. Определить основную погрешность измерения сопротивления и емкости соответственно по выражениям:

$$\Delta_i^{\Sigma R} = \sqrt{(\Delta_i^{R*})^2 + (\Delta_i^{oR})^2}, \quad (11)$$

$$\Delta_i^{\Sigma C} = \sqrt{(\Delta_i^{C*})^2 + (\Delta_i^{oC})^2}. \quad (12)$$

Рассмотренная методика повышения точности измерительного преобразователя импеданса может быть выполнена в виде программы.

Результаты

Результаты метрологических испытаний рассмотрим на примере образцовой меры № 2. Точные значения номиналов компонентов образцовой меры равны: $R_{p1} = 2000$ Ом, $R_{p2} = 20\,000$ Ом, $R_{p3} = 16,5$ Ом, $C_{p1} = 0,6713$ мкФ, $C_{p2} = 1,3481$ мкФ. Результаты пересчета сопротивления и емкости образцовой меры по параллельной эквивалентной электрической схеме даны в табл. 1.

Таблица 1

Результаты пересчета сопротивления и емкости образцовой меры по параллельной эквивалентной электрической схеме

Номер (i)	Частота f, Гц	Сопротивление R_p , Ом	Емкость C_p , мкФ
1	20	13285	1,008
2	38	7957	0,8232
3	76	5417	0,6083
4	152	4594	0,4947
5	305	4225	0,4579
6	610	3630	0,4478
7	1220	2380	0,4442
8	2441	1010	0,4394
9	4883	316	0,4232
10	9766	95	0,3693

Фрагменты выборок измеренных значений сопротивления и емкости образцовой меры, полученных по п. 1 рассмотренной методики, представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Результаты измерения сопротивления (фрагменты)

i	f , Гц	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом	R_7 , Ом
1	20	13147,4	13137,9	13149,1	13155,9	13146,1	13136,2	13156,8
2	38	7933,25	7932,28	7914,98	7940,84	7932,34	7904,17	7911,5
3	76	5433,45	5425,46	5418,61	5438,32	5432,54	5442,95	5434,46
4	152	4637,08	4623,94	4626,3	4632,74	4614,94	4620,91	4620,98
5	305	4290,33	4284,61	4284,73	4281,84	4277,24	4287,48	4284,14
6	610	3729,42	3709,36	3707,13	3711,11	3709,41	3704,54	3698,91
7	1220	2454,47	2442,79	2443,24	2433,67	2440,14	2439,13	2439,55
8	2441	1029,64	1024,78	1024,9	1026,87	1025,51	1023,7	1023,26
9	4883	319,15	318,84	318,772	318,301	318,519	318,135	317,951
10	9766	95,9803	87,7281	87,8152	87,8679	96,2078	96,2206	87,8017

Таблица 3

Результаты измерения емкости (фрагменты)

i	f , Гц	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	C_4 , мкФ	C_5 , мкФ	C_6 , мкФ
1	20	0,997199	0,997074	0,998302	0,997737	0,997308	0,997575
2	38	0,814054	0,812265	0,812185	0,814225	0,814215	0,813918
3	76	0,600315	0,601583	0,601142	0,600812	0,602092	0,601319
4	152	0,490757	0,490706	0,491455	0,491068	0,490802	0,491011
5	305	0,454609	0,454765	0,454744	0,454728	0,454852	0,45468
6	610	0,445468	0,445504	0,445339	0,445361	0,445391	0,445235
7	1220	0,442397	0,442365	0,442246	0,4424	0,442225	0,442312
8	2441	0,437503	0,43755	0,437185	0,437317	0,437159	0,437268
9	4883	0,42134	0,420954	0,420758	0,420818	0,420755	0,420686
10	9766	0,368918	0,355284	0,355521	0,355834	0,368836	0,368851

Как показал расчет, предельные значения относительных систематических погрешностей δ_i^R и δ_i^C сопротивления и емкости до введения поправочного коэффициента (п. 6 методики) составили 1,8 и 1,2 % соответственно, что больше требуемого значения (0,5 %), однако после калибровки по п. 8 они были сведены к минимуму (10^{-14} %) и фактически определялись погрешностью применяемого LCR-метра, что говорит об эффективности методики. Таким образом, на наибольший вклад в основную погрешность измерительного преобразователя вносит случайная погрешность, предельное значение которой как для сопротивления, так и для емкости (табл. 4) не превышает 0,5 %.

Таблица 4

Предельные значения случайной погрешности измерения сопротивления и емкости в абсолютном и относительном виде

Номер (i)	Частота, Гц	Δ_i^{OR} , Ом	δ_i^{OR} , %	Δ_i^{OC} , мкФ	δ_i^{OC} , %
1	20	26,909126	0,2025466	$1,657 \cdot 10^{-3}$	0,1643698
2	38	43,113747	0,5417917	$2,566 \cdot 10^{-3}$	0,311735
3	76	22,373777	0,412958	$2,007 \cdot 10^{-3}$	0,3299124
4	152	19,449396	0,4233417	$7,676 \cdot 10^{-4}$	0,1551527
5	305	18,414299	0,4358241	$2,474 \cdot 10^{-4}$	0,0540189
6	610	19,570792	0,4945658	$4,495 \cdot 10^{-4}$	0,100395
7	1220	17,82571	0,4690412	$7,521 \cdot 10^{-4}$	0,1693071
8	2441	10,236019	0,5027891	$9,416 \cdot 10^{-4}$	0,2142914
9	4883	1,348664	0,4264862	$1,233 \cdot 10^{-4}$	0,2912478
10	9766	1,293815	0,5178734	$1,997 \cdot 10^{-4}$	0,4071459

Заклучение

Проведенные метрологические испытания показали, что разработанный измерительный преобразователь удовлетворяет заявленным требованиям к точности измерений (основная относительная погрешность измерения сопротивления и емкости не превышает 0,5 %). Предложенная методика метрологических испытаний показала свою жизнеспособность: благодаря введению поправочного коэффициента удалось минимизировать систематическую погрешность и повысить точность измерений не менее, чем в 2 раза. Все это позволяет использовать разработанный измерительный преобразователь для исследования и контроля процесса микродугового окисления и электрофизических параметров формируемых покрытий.

Список литературы

1. Угодчикова А. В. Влияние параметров процесса микродугового окисления на свойства антибактериальных серебросодержащих кальцийфосфатных покрытий // Перспективы развития фундаментальных наук : материалы XIV Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (25–28 апреля 2017 г.). Томск : Изд-во НИ ТПУ, 2017. С. 366–368.
2. Булан И. В., Загоненко В. Ф. Влияние анодного импульса на характеристики оксидных покрытий, полученных микродуговым окислением // Электрофизические методы обработки в современной промышленности : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (18–20 декабря 2018 г.). Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2019. С. 98–102.
3. Мамаев А. И., Мамаева В. А., Бориков В. Н., Дорофеева Т. И. Формирование наноструктурных неметаллических неорганических покрытий путем локализации высокоэнергетических потоков на границе раздела фаз : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2010. 360 с.
4. Bolshenko A. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Panenko I. N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices // Life Science Journal. 2014. Vol. 11 (1s). P. 263–268.
5. Фаткуллин А. Р., Парфенов Е. В. Автоматизация технологического процесса плазменно-электролитического окисления на основе косвенного контроля толщины покрытия по электрическим характеристикам // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2016. Т. 20, № 4. С. 38–44.
6. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Development of theoretical foundations of the controlled synthesis of multifunctional coatings by the micro-arc oxidation method // FRUCT 2020 : proc. of the 26th Conference of Open Innovations Association (23–24 April 2020). Yaroslavl, 2020. P. 91–101.
7. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultraceraamic: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys // Surface & Coatings Technology. 2019. Vol. 369. P. 142–155.
8. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М. : Наука, 1973. Т. 2. 899 с.
9. Фаддеев М. А. Элементарная обработка результатов эксперимента : учеб. пособие. Нижний Новгород : ННГУ, 2010. 122 с.

References

1. Ugodchikova A.V. Influence of microarc oxidation process parameters on the properties of antibacterial silver-containing calcium phosphate coatings. *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk: materialy XIV Mezhdunar. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (25–28 aprelya 2017 g.) = Prospects for the development of fundamental sciences : Materials of the XIV International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists (April 25–28, 2017)*. Tomsk: Izd-vo NI TPU, 2017:366–368. (In Russ.)
2. Bulan I.V., Zagonenko V.F. The influence of the anode pulse on the characteristics of oxide coatings obtained by microarc oxidation. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoy promyshlennosti: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov (18–20 dekabrya 2018 g.) = Electrophysical processing methods in modern industry : materials of the II International Scientific and Practical Conference of Young scientists, postgraduates and students (December 18–20, 2018)*. Perm: Izd-vo PNIPIU, 2019:98–102. (In Russ.)
3. Mamaev A.I., Mamaeva V.A., Borikov V.N., Dorofeeva T.I. *Formirovanie nanostrukturnykh nemetallicheskikh neorganicheskikh pokrytiy putem lokalizatsii vysokoenergeticheskikh potokov na granitse razdela faz: ucheb. posobie = Formation of nanostructured nonmetallic inorganic coatings by localization of high-energy flows at the interface of phases : textbook*. Tomsk: Izd-vo Tomsk. un-ta, 2010:360. (In Russ.)
4. Bolshenko A.V., Pavlenko A.V., Puzin V.S., Panenko I.N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices. *Life Science Journal*. 2014;11(1s):263–268.
5. Fatkulkin A.R., Parfenov E.V. Automation of the technological process of plasma-electrolytic oxidation based on indirect control of the coating thickness by electrical characteristics. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2016;20(4):38–44. (In Russ.)

6. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Development of theoretical foundations of the controlled synthesis of multifunctional coatings by the micro-arc oxidation method. *FRUCT 2020: proc. of the 26th Conference of Open Innovations Association (23–24 April 2020)*. Yaroslavl, 2020:91–101.
7. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultraceraamic: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys. *Surface & Coatings Technology*. 2019;369:142–155.
8. Kendall M., St'yuart A. *Statisticheskie vyvody i svyazi = Statistical conclusions and connections*. Moscow: Nauka, 1973;2:899. (In Russ.)
9. Faddeev M.A. *Elementarnaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta: ucheb. posobie = Elementary processing of experimental results : textbook*. Nizhny Novgorod: NNGU, 2010:122. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Евгеньевич Голубков

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

Pavel E. Golubkov

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

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

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

Oleg V. Karpanin

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

Владимир Сергеевич Александров

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

Vladimir S. Aleksandrov

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

Юрий Александрович Вареник

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

Yuriy A. Varenik

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

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

Поступила в редакцию/Received 06.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 13.09.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

УДК 615.47
doi:10.21685/2307-5538-2021-4-7

УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ «ХОЛОДНОЙ» ПЛАЗМЫ

Е. В. Зыков¹, В. М. Чайковский²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является устройство для получения «холодной» плазмы. Предметом предлагаемого исследования является разработка с последующим макетированием устройства получения и управления «холодной» плазмой. Непосредственной целью работы является разработка достаточно простого устройства из отечественных комплектующих, имеющихся в свободном доступе. *Материалы и методы.* Описан подход к разработке предлагаемого устройства управления с приведением его принципиальной схемы, дано описание и назначение ее элементов. *Результаты.* На основе предложенного подхода осуществлено макетирование устройства формирования «холодной» плазмы, с реальным наблюдением ее наличия, подтвержденного фотоснимком. *Выводы.* Практическая реализация предложенного устройства подтвердила обеспечение им стабильной работоспособности при достаточной простоте его схемотехнического построения с использованием общедоступных комплектующих. В результате получения стабильной во времени «холодной» плазмы предложены различные варианты ее практического применения.

Ключевые слова: «холодная» плазма, управление, объемные пульсации, воспроизведение, строчный трансформатор, электродуговой разряд, косметология

Для цитирования: Зыков Е. В., Чайковский В. М. Устройство формирования «холодной» плазмы // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 60–66. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-7

DEVICE FOR FORMING «COLD» PLASMA

E.V. Zykov¹, V.M. Chaykovskiy²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia
^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is a device for producing «cold» plasma. The subject of the proposed research is the development, with subsequent modeling, of a device for obtaining and controlling «cold» plasma. The immediate goal of the work is to develop a fairly simple device from domestic components that are freely available. *Materials and methods.* The approach to the development of the proposed control device with its schematic diagram is described, the description and purpose of its elements are given. *Results.* On the basis of the proposed approach, a mock-up of the device for forming «cold» plasma was carried out, with real observation of its presence, confirmed by a photograph. *Conclusions.* The practical implementation of the proposed device confirmed that it provides stable performance with sufficient simplicity of its circuit design using publicly available components. As a result of obtaining a time-stable «cold» plasma, various variants of its practical application are proposed.

Keywords: «cold» plasma, control, volume pulsations, playback, string transformer, electric arc discharge, cosmetology

For citation: Zykov E.V., Chaykovskiy V.M. Device for forming «cold» plasma. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):60–66. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-7

Новое направление исследований, появившееся в XX в., основанное на использовании сильно ионизированного газа – плазмы, благодаря обладанию ею рядом заметных достоинств обещает ее широкое применение в различных областях человеческой деятельности. Согласно теории исследования плазмы [1, 2], полученной в электродуговом разряде, она может быть

«холодной», низкоэнергетической, нетепловой, т.е. комнатной температуры, и «горячей», высокотемпературной, высокоэнергетической.

Однако практика использования «горячей» плазмы в клинической медицине из-за ее слишком чрезмерного воздействия на живую биологическую ткань человеческого организма, разрушения необратимо измененных, пораженных участков тканей, окружающих и близлежащих, еще вполне здоровых получила довольно ограниченное применение. Следует отметить, что метод радиочастотной хирургии «холодной» плазмы, предложенный в конце XX в. [3], благодаря своей безболезненности и отсутствию каких-либо побочных эффектов получает все более широкое применение, особенно в области косметологии, эстетической и ЛОР-хирургии, а также онкологии. «Холодная» плазма представляет собой облако сильно ионизированного газа с очень высокой концентрацией заряженных частиц в виде электронов и ионов при относительно низкой, комнатной температуре порядка $+45 \dots +55$ °С. При этом, кроме того, «холодная» плазма широко используется при разработке генератора плазменных шаров [4, 5], предназначенного для использования в сочетании с различными светодинамическими и цветомузыкальными инсталляциями [6], при организации различных световых шоу, а также при озвучивании музыкальных произведений различной жанровой направленности [7], путем замены акустических динамиков, характеризующихся значительными колебательными, вибрационными движениями (дрожанием) диафрагмы диффузора, которая перемещает значительные воздушные массы и в то же время обладает значительной инерцией, что приводит к воспроизведению высокочастотных электрических сигналов с большими искажениями. Тогда как последние сигналы лучше воспроизводятся «холодной» плазмой, которая производит звук за счет объемных пульсаций, возникающих в теле высокочастотного электродугового разряда, модулированного исходным электрическим звуковым сигналом, т.е. источник звука находится непосредственно в пламени разряда. Благодаря быстрой, без какой-либо инерции, передаче дуговым разрядом высокочастотных колебаний в воздух достигается более лучшее воспроизведение высоких составляющих оригинального, исходного аудиосигнала.

Отличительная особенность предлагаемой работы заключается в ее подходе, ориентированном на разработку простого устройства из отечественных комплектующих, способного сформировать управляемую «холодную» плазму, которая будет возникать внутри высокочастотного разряда с изменяющимся значением его тока под действием модулирующего сигнала, являющегося управляющим, под действием которого внутри объема разряда появляются пульсации, вызывающие акустические колебания в окружающем пространстве.

Как показывают дальнейшие исследования, данный прием получения «холодной» плазмы обладает достаточной универсальностью, так как он может найти различные варианты своего практического применения, а именно: его можно использовать как для реализации плазменного громкоговорителя [7], так и для изготовления плазменной ручки, которая найдет самое широкое применение в медицинских учреждениях и особенно в различных салонах красоты [8].

Получение дугового разряда основано на использовании усилителя, нагрузкой которого является строчный высоковольтный трансформатор, формирующий высокочастотное напряжение с амплитудой в несколько киловольт, которое в свою очередь создает высокочастотную электрическую дугу на выходных контактах вторичной обмотки данного трансформатора, в качестве которого используется распространенный тип строчного трансформатора, а именно, трансформатор диодно-каскадной строчной развертки (ТДКС) [9].

С целью получения от используемого усилителя повышенного значения выходной мощности его режим работы выбирается соответствующим классу D, опыт получения которого к текущему времени накоплен огромный [10,11], структура построения разработанного устройства формирования «холодной» плазмы приведена на рис. 1, из которого видно, что электродуговой разряд в виде «холодной» плазмы формируется между контактными электродами выходной обмотки строчного трансформатора. Следует отметить, что предлагаемое в данной работе устройство формирования «холодной» плазмы может быть использовано для создания устройства, удаляющего различные доброкачественные новообразования кожного покрова [3, 8]. Однако доведение этого предложения до практической реализации требует проведения серьезных клинических исследований на базе медицинского учреждения на различных образцах биологических тканей. Для того, чтобы выяснить следующие моменты: ка-

кое требуется значение частоты гармонического модулирующего сигнала и как долго «холодной» плазмой следует воздействовать на пораженный участок кожи, чтобы получить наиболее положительный эффект, другими словами, необходимо изучить процесс воздействия «холодной» плазмы применительно к данной ситуации, т.е. разработать методические указания по ее практическому применению. При этом также потребуется доработать конструкцию контактного электрода с возможностью придания ему ряда сменных насадок, позволяющих в зависимости от назначения и характера процедуры формировать плазму в виде дугового разряда, имеющего необходимый диаметр и мощность, которые могут быть подобраны индивидуально для каждого человека с учетом его пожеланий и потребностей. В будущем возможно использование контакта-сопла, способного образовывать плазменную струю, что, несомненно, расширит спектр предоставляемых медицинских процедур, особенно косметического характера.

Суть работы предлагаемого устройства формирования сводится к следующему.

Формируемый аналоговым компаратором сигнал типа ШИМ, осуществляющий управление работой усилителя мощности, получается на выходе компаратора в результате сравнения последним амплитуды опорного сигнала пилообразной формы, имеющего постоянное значение частоты повторения, с амплитудой напряжения сигнала гармонической формы, являющегося модулируемым по отношению к напряжению пилообразной формы. Каждое из указанных напряжений подается на соответствующий вход компаратора.

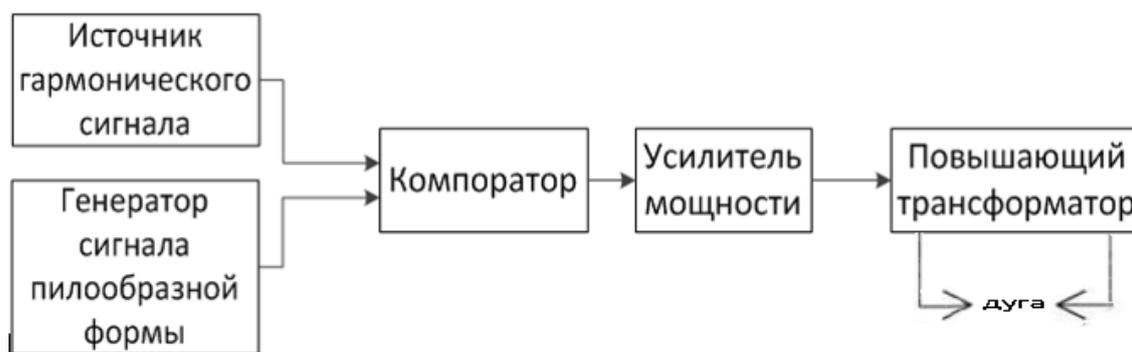


Рис. 1. Структура построения устройства формирования плазмы

Иными словами, пилообразный сигнал будет выполнять роль модулирующего, а гармонический, однотональный – модулируемого. Требуется заметить, что от характера дальнейшего практического использования сформированной «холодной» плазмы будет определяться вид модулируемого сигнала. Если сформированная плазма будет использоваться в медицинских целях, то от характера проведения предполагаемой медицинской процедуры модулируемый сигнал должен иметь однотональный сигнал гармонической формы с тем или иным значением частоты. А если плазма будет использоваться для проведения высококачественного воспроизведения сигнала музыкального фрагмента различного жанра, то тогда последний также будет выполнять роль модулируемого сигнала и также с подачей его на соответствующий вход компаратора.

Длительность периода повторения напряжения, вырабатываемого встроенным, внутренним генератором и имеющего пилообразную форму изменения, будет однозначно определять значение длительности периода повторения выходного напряжения компаратора, которое в свою очередь будет являться импульсным напряжением с широтно-импульсной модуляцией.

Как только произойдет превышение уровня входного напряжения, выполняющего роль модулируемого, уровня пилообразного напряжения, являющегося соответственно модулирующим, на выходе компаратора будет сформирован импульс напряжения с отрицательным уровнем и произойдет наоборот, как только амплитуда модулирующего сигнала станет ниже уровня пилообразного напряжения, на выходе компаратора будет сформирован импульс напряжения с положительной амплитудой.

Здесь микросхема 114EУ4В выполняет функцию ШИМ-контроллера, за счет наличия у нее целого ряда необходимых блоков, позволяющих считать ее ШИМ-контроллером, пред-

назначенным для работы в составе импульсного источника питания. При этом значение длительности периода повторения формируемого напряжения пилообразной формы регулируется изменением номинальных значений элементов R2, R3 и C3 (рис. 2). Переменным резистором R2 производится регулировка значения длительности периода повторения пилообразного напряжения, причем данный резистор обладает зависимостью типа А с линейным характером. При этом длительность периода повторения напряжения пилообразной формы, вырабатываемого встроенным генератором, изменяется в соответствии с равенством $T = RC/K$, где согласно с РТМ (руководящим технологическим материалом) на микросхему 114ЕУ4, K – коэффициент пропорциональности берется равным 1,1.

Изменение значения длительности периода повторения выходной импульсной последовательности происходит в результате операции сравнения амплитуды пилообразного напряжения, имеющего положительную полярность и выделяющегося на конденсаторе C3, с амплитудой напряжения управляющего сигнала. Периодическая смена логического состояния, осуществляющаяся на выходе элемента ИЛИ-НЕ, будет менять состояние выходного транзистора микросхемы, представляющего собой управляемый аналоговый ключ, тем самым периодически осуществляя смену его состояния на противоположное, причем это будет происходить только при нахождении тактового выхода триггера, имеющегося в составе ШИМ-контроллера, в логическом нуле. Последнее будет происходить только в то время, когда значение амплитуды пилообразного напряжения превышает уровень амплитуды управляющих сигналов. С учетом сказанного рост значения уровня модулирующего сигнала будет вызывать соответствующее линейное увеличение скважности импульсного напряжения формируемого на выходе компаратора. Компаратор изменяет скважность ШИМ – импульсного напряжения на своем выходе от максимального значения, задаваемого уровнем напряжения на выводе 04 микросхемы 114ЕУ4, до так называемого «мертвого» значения интервала времени, который регулировкой значения резистора R1, имеющего передаточную характеристику аналогичную резистору R2 (рис. 2) можно изменять длительность данного интервала и довести ее до нулевого значения.

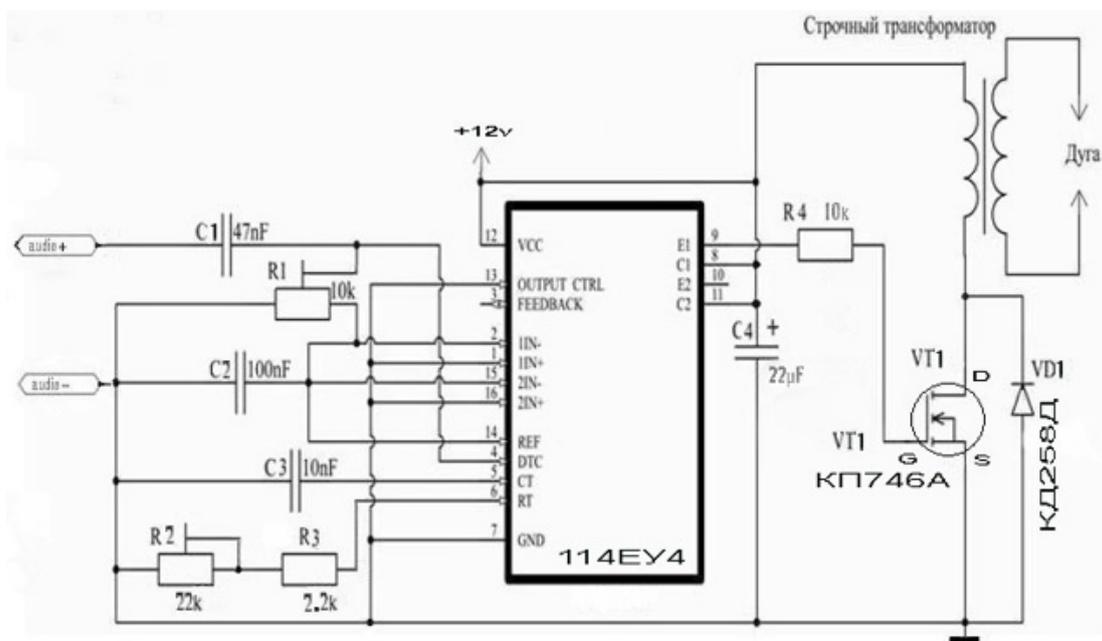


Рис. 2. Схема реализации устройства формирования

В дальнейшем выходное напряжение компаратора, формируемое на выходе E1 (контакт 09 микросхемы 114ЕУ4) и являющееся импульсной последовательностью с широтно-импульсной модуляцией, поступает строго через резистор R4, выполняющего роль токоограничительного, на затвор n -канального МДП-транзистора VT1 типа КП746А, являющегося аналоговым ключом, коммутирующим токовую цепь первичной обмотки строчного транс-

форматора. Учитывая то, что VT1 коммутирует достаточно сильноточную цепь, то требуется предусмотреть его охлаждение посредством радиатора [12] из-за выделяющегося значительного тепла на его внутреннем сопротивлении.

Для снижения эффекта проявления ЭДС самоиндукции, образующейся на индуктивности первичной обмотки строчного трансформатора в момент разрыва ее токовой цепи транзистором VT1, между его истоком и стоком помещен диод VD1 типа КД258Д, выполняющий роль быстродействующей демпфирующей цепи, замыкающей на корпус появляющуюся ЭДС самоиндукции.

Выходной электрод VT1 соединен с началом первичной обмотки строчного трансформатора, конец которой подключен к источнику питания 12 В, сама первичная обмотка состоит из 10 витков, намотанных виток к витку проводом диаметром 1,2 мм. За счет действия «повышающего» эффекта трансформатора на выходных зажимах вторичной обмотки строчного трансформатора формируется разность потенциалов до 15 тысяч вольт, в результате чего между выходными электродами будем наблюдать явление электрического пробоя воздушного промежутка. При этом последний вызовет образование электрического разряда, сопровождающегося акустическим звучанием, причиной появления которого будут объемные пульсации, которые в свою очередь вызывают колебания окружающей воздушной массы. Тональность данного звучания будет соответствовать тональности сигнала, играющего роль управляющего и поступающего через разделительный конденсатор С1 на один из входов компаратора, а именно, на контакт 04 микросхемы 114ЕУ4.

Натурные испытания макета предлагаемого устройства формирования «холодной» плазмы (рис. 3) показали стабильность мощности последней и возможность изменения тональности создаваемого объемными пульсациями плазмы акустического звучания при изменении частоты модулирующего сигнала, роль которого выполнял выходной сигнал низкочастотного генератора ГЗ-18, представляющий собой гармонический сигнал с амплитудой в 1 В.

Дополнительно испытания показали, что сменой наконечников (заточенных остроконечно или округло) выходных электродов можно менять мощность, конфигурацию дуги и даже ее объем, что, соответственно, увеличивает размер объемных пульсаций, а это, соответственно, повышает вызываемый пульсациями уровень акустического звучания.

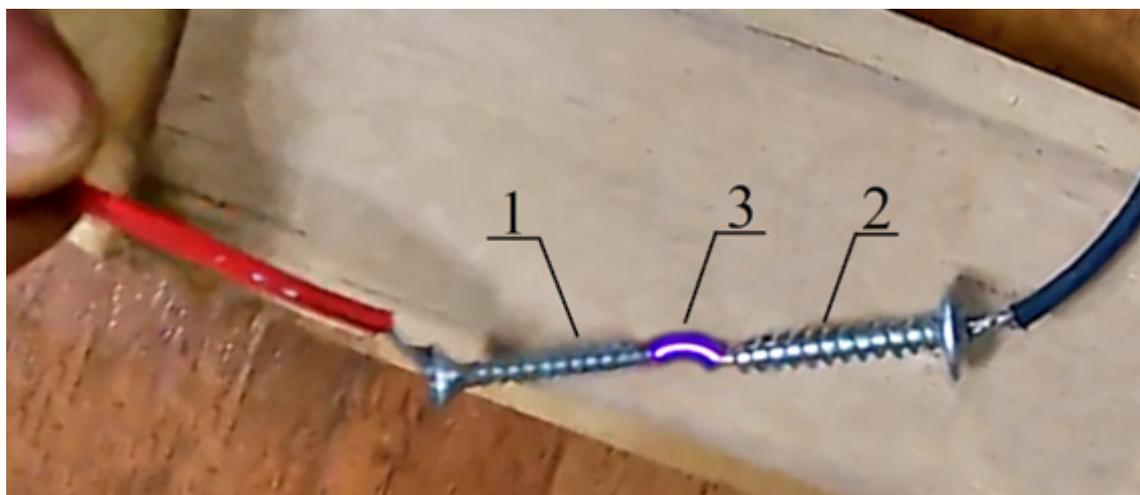


Рис. 3. Фото сформированной плазмы:
1, 2 – наконечники выходных электродов; 3 – плазма

Поэтому в зависимости от предназначения использования «холодной» плазмы, получаемой с помощью данного устройства формирования, необходимо проведение дополнительных исследований по разработке различных видов конструкций контактирующего устройства, что, несомненно, расширит спектр практического применения «холодной» плазмы, а именно, сможет использовать ее в качестве звуковоспроизводящего устройства, обладающего достаточно качественным воспроизведением высокочастотных составляющих модулирующего сигнала [13], а также в качестве медицинского инструмента при проведении различных медицинских про-

цедур [14, 15], особенно в области оказания косметологических услуг и даже для обеззараживания воды [16].

Список литературы

1. Котельников И. А., Ступаков Г. В. Лекции по физике плазмы : учеб. пособие. Новосибирск : Новосибир. ун-т, 1996.
2. Kong P. Atmospheric-Pressure Plasma Process and Applications // SOHN International Symposium On Advanced Processing of Metals and Materials; Principles, Technologies and Industrial Practice. 2006.
3. Алейник Н. А. Плазменная медицина : учеб. пособие. Томск, 2011.
4. Metelmann H.-R., Woedtke von T., Weltmann K.-D. Comprehensive Clinical Plasma Medicine: Cold Physical Plasma for Medical Application. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018.
5. Bernhardt P. A., Rock B., Pereira N. Microwave Driven Plasma Ball Generator For Illumination And Rf Applications // IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 2017, Atlantic City, NJ, USA. doi: 10.1109/PLASMA.2017.8496289. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8496289>
6. Цветомузыкальные устройства. Любительские схемы / сост. А. А. Халоян. М. : ИП РадиоСофт, 2001.
7. Чайковский В. М., Аксенов И. В. [и др.]. Звуковоспроизводящее устройство на основе объемных пульсаций в теле высокочастотного электродугового разряда // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 2.
8. Федотов В. П., Корецкая Е. Ю. [и др.]. Аппаратная косметология : учеб. пособие. Запорожье : Прогресс, 2013.
9. Родин А. В. Строчные трансформаторы современных телевизоров. Аналоги и характеристики. М. : СОЛОН-Пресс, 2010.
10. Вайсбурд Ф. И. [и др.]. Электронные приборы и усилители. Изд. 4-е, стереотип. М. : КомКнига, 2007.
11. Лившиц И. И. Транзисторные усилители в режиме D. Л. : Энергия, 1973.
12. Панфилов С. А. Эффективное охлаждение новых высокоомощных силовых полупроводниковых приборов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 4.
13. Galechyan G. A. Acoustic waves in plasma // Phys.-Usp. 1995. Vol. 38. P. 1309. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/PU1995v038n12ABEH000123/pdf>
14. Motaln H., Recek N., Rogelj B. Intracellular responses triggered by cold atmospheric plasma and plasma-activated media in cancer cells // Molecules. 2021. Vol. 26 (5). Art. 1336. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85103919874&doi=10.3390%2fmolecules26051336&partnerID=40&md5=840ad09280fe7f3423f2fe9fde7c172c>
15. Bernhardt P. A., Rock B., Pereira N. Microwave Driven Plasma Ball Generator For Illumination And Rf Applications // IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) (October 2018). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8496289>
16. Десятов А. В., Кручинина Н. Е., Колесников А. В. [и др.] Исследование возможности обеззараживания воды воздействием холодной плазмы при кавитации в высокоскоростных потоках воды // Вода: химия и экология. 2015. № 9. С. 76–80. URL: <https://rucont.ru/efd/421311>

References

1. Kotel'nikov I.A., Stupakov G.V. *Leksii po fizike plazmy: ucheb. posobie = Lectures on plasma physics : textbook*. Novosibirsk: Novosib. un-t, 1996. (In Russ.)
2. Kong P. Atmospheric-Pressure Plasma Process and Applications. *SOHN International Symposium On Advanced Processing of Metals and Materials; Principles, Technologies and Industrial Practice*. 2006.
3. Aleynik N.A. *Plazmennaya meditsina: ucheb. posobie = Plasma medicine : textbook*. Tomsk, 2011. (In Russ.)
4. Metelmann H.-R., Woedtke von T., Weltmann K.-D. *Comprehensive Clinical Plasma Medicine: Cold Physical Plasma for Medical Application*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018.
5. Bernhardt P.A., Rock B., Pereira N. Microwave Driven Plasma Ball Generator For Illumination And Rf Applications. *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 2017*, Atlantic City, NJ, USA. doi: 10.1109/PLASMA.2017.8496289. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8496289>
6. Khaloyan A.A. (comp.). *Tsvetomuzikal'nye ustroystva. Lyubitel'skie skhemy = Color music devices. Amateur schemes*. Moscow: IP RadioSoft, 2001. (In Russ.)

7. Chaykovskiy V.M., Aksenov I.V. [et al.]. A sound reproducing device based on volumetric pulsations in the body of a high-frequency electric arc discharge. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;2. (In Russ.)
8. Fedotov V.P., Koretskaya E.Yu. [et al.]. *Apparatnaya kosmetologiya: ucheb. posobie = Hardware cosmetology : textbook*. Zaporozhe: Pro-svita, 2013. (In Russ.)
9. Rodin A.V. *Strochnye transformatory sovremennykh televizorov. Analogi i kharakteristiki = Lowercase transformers of modern televisions. Analogues and characteristics*. Moscow: SOLON-Press, 2010. (In Russ.)
10. Vaysburd F.I. [et al.]. *Elektronnye pribory i usiliteli. Izd. 4-e, stereotip = Electronic devices and amplifiers. Ed. 4th, stereotipe*. Moscow: KomKniga, 2007. (In Russ.)
11. Livshits I.I. *Tranzistornye usiliteli v rezhime D = Transistor amplifiers in the mode of D*. Leningrad: Energiya, 1973. (In Russ.)
12. Panfilov S.A. Effective cooling of new high-power power semiconductor devices. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy Region. Tekhnicheskije nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga Region. Technical sciences*. 2012;(4). (In Russ.)
13. Galechyan G.A. Acoustic waves in plasma. *Phys.-Usp.* 1995;38:1309. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/PU1995v038n12ABEH000123/pdf>
14. Motaln H., Recek N., Rogelj B. Intracellular responses triggered by cold atmospheric plasma and plasma-activated media in cancer cells. *Molecules*. 2021;26(5):1336. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85103919874&doi=10.3390%2fmolecules26051336&partnerID=40&md5=840ad09280fe7f3423f2fe9fde7c172c>
15. Bernhardt P.A., Rock B., Pereira N. Microwave Driven Plasma Ball Generator For Illumination And Rf Applications. *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) (October 2018)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8496289>
16. Desyatov A.V., Kruchinina N.E., Kolesnikov A.V. [et al.] Investigation of the possibility of disinfection of water by exposure to cold plasma during cavitation in high-speed water flows. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: chemistry and ecology*. 2015;(9):76–80. (In Russ.). Available at: <https://rucont.ru/efd/421311>

Информация об авторах / Information about the authors

Ефим Витальевич Зыков

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

Efim V. Zykov

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

Виктор Михайлович Чайковский

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

Victor M. Chaykovskiy

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

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

Поступила в редакцию / Received 16.06.2021

Поступила после рецензирования / Revised 24.06.2021

Принята к публикации / Accepted 29.09.2021

ТЕСТИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК ВЫЧИСЛЕНИЯ СТАНДАРТНОГО ОТКЛОНЕНИЯ МАЛЫХ ВЫБОРОК БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В. И. Волчихин¹, А. И. Иванов², Е. А. Малыгина³,
С. В. Качалин⁴, С. А. Полковникова⁵

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

² Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

⁴ НПП «Рубин», Пенза, Россия

¹ vvi@pnzgu.ru, ² ivan@pniei.penza.ru, ³ tsib@pnzgu.ru, ⁴ s.kachalin@gmail.com, ⁵ 1996svetlanaserikova@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается статистический анализ малых выборок в 16 опытов через оценку стандартного отклонения. Целью работы является нейросетевое предсказание ошибок вычисления стандартных отклонений на малых выборках биометрических данных. *Материалы и методы.* Для предсказания значений ошибок вычисления стандартных отклонений использованы многослойные сети искусственных нейронов. Алгоритмы обучения глубоких нейронных сетей хорошо известны. Главной проблемой для их реализации обычно является получение достаточно больших обучающих выборок. Новизна подхода заключается в том, что для рассматриваемой задачи использован автомат формирования обучающих выборок с разным значением ошибок оценки стандартного отклонения. *Результаты.* Созданный нейросетевой корректор ошибок позволяет снизить интервал ошибок вычисления стандартного отклонения на 22,7 % для выборок объемом в 16 опытов. При этом выявлена проблема, состоящая в необходимости выполнять длительное обучение многослойных нейронных сетей для каждого нового объема выборок. *Вывод.* Анализ полученных результатов в ходе проведенного исследования показал, что нейросетевые корректоры ошибок могут повысить достоверность статистических оценок и иных моментов. При этом могут быть созданы нейросетевые предсказатели ошибок вычисления математических ожиданий и коэффициентов корреляции. Предположительно, процесс улучшения достоверности будет монотонен и через один или два года удастся снизить интервал неопределенности вычислений дополнительно на 20 % за счет использования сетей из 15 или 20 слоев нейронов.

Ключевые слова: анализ малых выборок, многослойная сеть искусственных нейронов, предсказание ошибок вычисления стандартного отклонения

Для цитирования: Волчихин В. И., Иванов А. И., Малыгина Е. А., Качалин С. В., Полковникова С. А. Тестирование качества нейросетевой коррекции ошибок вычисления стандартного отклонения малых выборок биометрических данных // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 67–72. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-8

TESTING THE QUALITY OF NEURAL NETWORK ERROR CORRECTION FOR CALCULATING THE STANDARD DEVIATION OF SMALL SAMPLES OF BIOMETRIC DATA

V.I. Volchikhin¹, A.I. Ivanov², E.A. Malygina³, S.V. Kachalin⁴, S.A. Polkovnikova⁵

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

² Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

⁴ NPP "Rubin", Penza, Russia

¹ vvi@pnzgu.ru, ² ivan@pniei.penza.ru, ³ tsib@pnzgu.ru, ⁴ s.kachalin@gmail.com, ⁵ 1996svetlanaserikova@gmail.com

Abstract. *Background.* The statistical analysis of small samples in 16 experiments using the standard deviation estimation is considered. The aim of the work is the neural network prediction of errors in calculating standard deviations on small samples of biometric data. *Materials and methods.* Multi-layer networks of artificial neurons were used to predict the values of errors in calculating standard deviations. Deep neural network learning algorithms are well known.

The main problem for their implementation is usually to obtain sufficiently large training samples. The novelty of the approach lies in the fact that for the problem under consideration, an automatic machine for forming training samples with different values of errors in estimating the standard deviation is used. *Results.* The created neural network error corrector reduces the error interval for calculating the standard deviation by 22.7 % for samples of 16 experiments. At the same time, the problem is revealed, which consists in the need to perform long-term training of multilayer neural networks for each new volume of samples. *Conclusion.* The analysis of the results obtained in the course of the study showed that neural network error correctors can increase the reliability of statistical estimates and other points. At the same time, neural network predictors of errors in calculating mathematical expectations and correlation coefficients can be created. It is assumed that the process of improving confidence will be monotonous and in one or two years it will be possible to reduce the uncertainty interval of calculations by an additional 20 % by using networks of 15 or 20 layers of neurons.

Keywords: analysis of small samples, multilayer network of artificial neurons, prediction of errors in calculating the standard deviation

For citation: Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Malygina E.A., Kachalin S.V., Polkovnikova S.A. Testing the quality of neural network error correction for calculating the standard deviation of small samples of biometric data. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):67–72. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-8

Введение

Отечественная нейросетевая биометрия опирается на ряд национальных стандартов, в том числе на стандарт ГОСТ Р 52633.5-2011, регламентирующих процедуры автоматического обучения нейронной сети на 16 примерах образа «Свой»¹. Эти процедуры построены на использовании математических ожиданий и стандартных отклонений малых выборок обучения. К сожалению, при вычислении младших статистических моментов на малых выборках возникают значительные ошибки. При вычислении стандартного отклонения по классической формуле относительная ошибка $\Delta\sigma$ может достигать десятков процентов:

$$\sigma(16) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{15} (E(x) - x_i)^2}, \quad (1),$$

где $E(x)$ – математическое ожидание малой выборки в 16 опытов.

Пример распределения значений σ для малых выборок в 16 примеров с эталонными данными с единичным стандартным отклонением приведено на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что представленное на нем распределение близко к нормальному со стандартным отклонением $\sigma(\sigma, 16) = 0,177$.

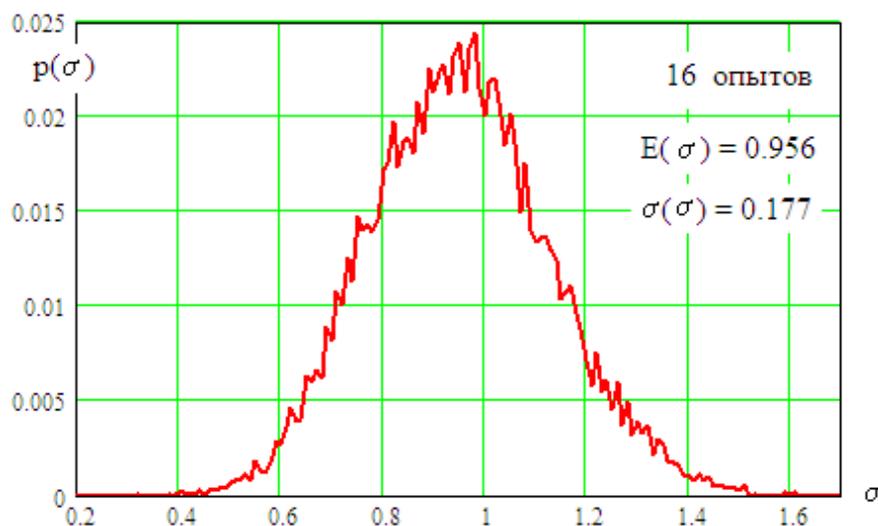


Рис. 1. Распределение значений ошибок при вычислении стандартного отклонения по классической формуле на малых выборках

¹ ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа.

Если обучающая выборка будет монотонно расти, то стандартное распределение значений, вычисленных по классической формуле (1), будет уменьшаться:

$$\sigma(\sigma, N) \approx \frac{0,177}{\sqrt{(N-16)/16}}, \tag{2}$$

где N – число примеров в выборке большей, чем 16 примеров.

Нейросетевое предсказание значений ошибок при вычислениях по классической формуле

В прошлом веке наш соотечественник А. И. Галушкин [1–3] предложил использовать глубокие сети искусственных нейронов и метод обратного распространения ошибки для их обучения. К сожалению, ЭВМ в 1974 г. не имели достаточных вычислительных ресурсов, и, соответственно, идеи А. И. Галушкина в СССР не могли быть реализованы по объективным причинам.

Ситуация изменилась только в 2014 г., усилиями ряда зарубежных исследователей была создана промышленная технология для обработки биометрических данных по распознаванию лиц и голосов пользователей [4, 5].

Очевидным является то, что многослойные нейронные сети универсальны, т.е. многослойные нейронные сети могут быть использованы для предсказания ошибок вычисления стандартных отклонений на малых выборках. Блок-схема такого преобразования приведена на рис. 2.

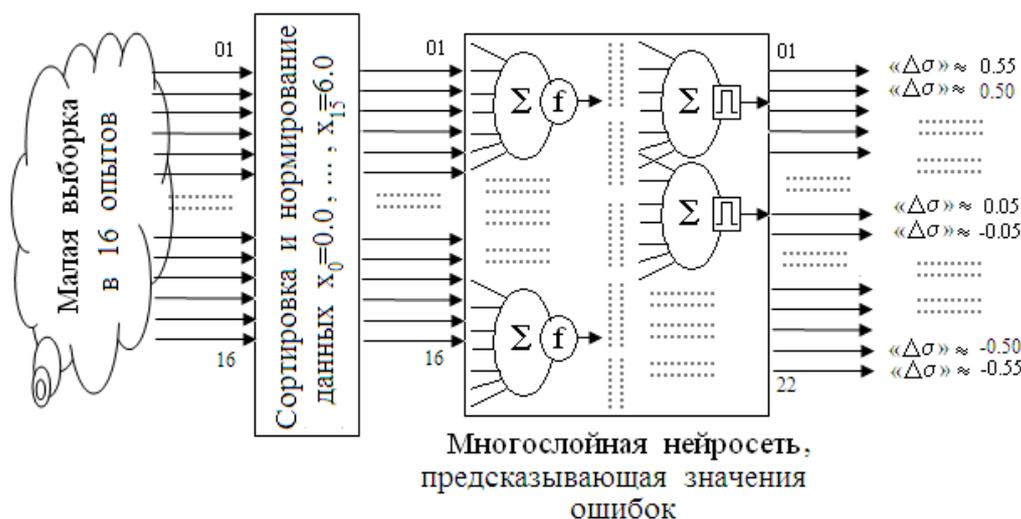


Рис. 2. Блок-схема предсказания 22 значений дискретных состояний ошибок – «Δσ» обученной многослойной сетью искусственных нейронов

Так как биометрические данные изменяются в достаточно широком динамическом диапазоне, перед их подключением к входам нейросети необходимо выполнить их нормировку:

$$\begin{cases} x \leftarrow \text{sort}(x), \\ \text{for } i \in 0 \dots 15, \\ x_i \leftarrow x_i - x_0, \\ x_i \leftarrow \frac{6x_i}{x_{15}}. \end{cases} \tag{3}$$

Нормировка сводится к сортировке данных по их возрастанию и приведению минимального значения параметров к нулевому состоянию $x_0 = 0,0$. Наибольшее значение в выборке после выполнения преобразований (3) составляет $x_{15} = 6,0$.

Важным является также то, что обучение многослойных нейронных сетей требует больших объемов примеров в обучающих выборках. В нашем случае задача является простой. Данные могут быть получены от программного генератора псевдослучайных чисел с нор-

мальным распределением с произвольным стандартным распределением. Проблема предварительной ручной разметки биометрических данных, существующая при обучении многослойных нейронных сетей распознаванию лиц пользователей и голосов пользователей, не существует.

Корректировка данных классической формулы вычисления стандартного отклонения и тестирование результатов

Обучение многослойных нейросетевых предсказателей значений ошибок может занимать достаточно много времени. Однако после обучения с достаточно высокой доверительной вероятностью на уровне 0,71 мы обладаем информацией о том или ином дискретном значении ошибок вычисления – « $\Delta\sigma$ », т.е. мы можем выполнить аддитивную корректировку данных, полученных по классической формуле

$$\tilde{\sigma}(16) = \sigma(16) - \langle \Delta\sigma(16) \rangle. \quad (4)$$

Чем выше доверительная вероятность, с которой нейросетевой предсказатель указывает одно из 22 дискретных значений ошибки « $\Delta\sigma(16)$ », тем точнее выполняется аддитивная корректировка (4). В будущем, когда возможно будет угадывать дискретное значение ошибки вычисления с высокой доверительной вероятностью 0,99, интервал неопределенности может снизиться до 22 раз:

$$\frac{\sigma(16)}{\tilde{\sigma}(16)} \approx 22. \quad (5)$$

Дальнейшему сужению интервала ошибок станет мешать принятая структура нейросетевого преобразователя (рис. 2). Для продолжения повышения точности оценок придется увеличивать число нейронов в последнем слое нейросетевого предсказателя.

Результаты тестирования рассматриваемого аддитивного нейросетевого корректора приведены на рис. 3.

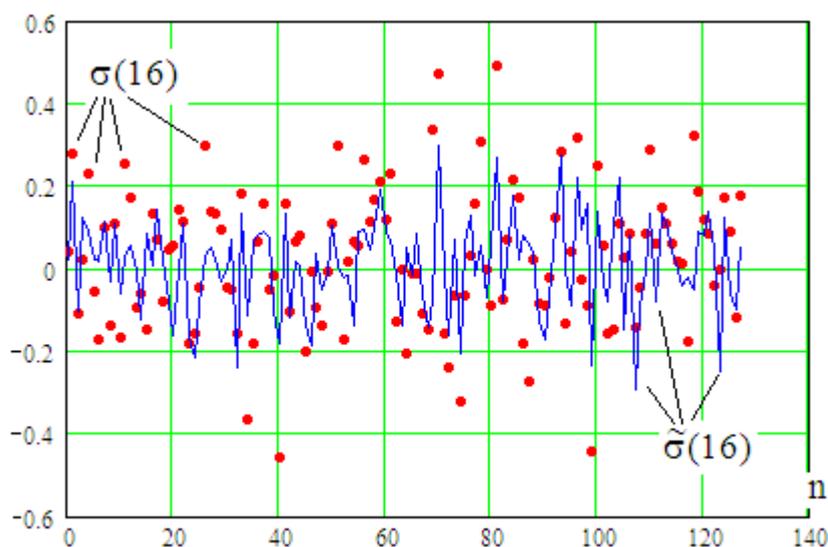


Рис. 3. Результаты тестирования работы нейросетевого корректора $\tilde{\sigma}(16)$ ошибок вычисления по классической формуле $\sigma(16)$ на 128 опытах

Проведение тестирования показало, что нейросетевой корректор позволяет снизить исходный интервал неопределенности (см. рис. 1) на 22,7 %. Стандартное отклонение данных, вычисленных по классической формуле (1) $\sigma(\sigma) \approx 0,177$, после корректировки снижается до величины 0,145. Это эквивалентно увеличению обучающей выборки с 16 опытов до существенно большей эквивалентной выборки в 23 опыта (оценка выполнена по формуле (2)). Получается, что привлечение дополнительной нейросетевой обработки биометрических данных

позволяет фактически на 7 примеров увеличить объем эквивалентной обучающей выборки с объема в 16 примеров до 23 примеров.

Заклучение

Рассматриваемая в статье нейросеть имеет 16 входов, 22 выхода и 5 слоев нейронов. Предположительно, увеличение числа слоев искусственных нейронов в ближайшем будущем позволит и дальше снижать интервал неопределенности вычислений.

На данный момент границы повышения достоверности принимаемых решений за счет усложнения нейросетевой предобработки биометрических данных не определены. Предположительно, процесс улучшения достоверности будет монотонен, и через один или два года удастся снизить интервал неопределенности вычислений дополнительно на 20 % за счет использования сетей из 15 или 20 слоев нейронов.

Очевидным также является то, что нейросетевые корректоры ошибок могут повышать достоверность статистических оценок и иных моментов, в том числе могут быть созданы нейросетевые предсказатели ошибок вычисления математических ожиданий и коэффициентов корреляции.

Список литературы

1. Галушкин А. И. Синтез многослойных систем распознавания образов. М. : Энергия, 1974.
2. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. 2-е изд., испр. М. : Вильямс, 2006. 1104 с.
3. Горбаченко В. И. Нейроинформатика : конспект лекций. Пенза : Пенз. гос. пед. ун-т им. В. Г. Белинского, 2011. 81 с.
4. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилл А. Глубокое обучение. М. : ДМК Пресс, 2017. 652 с.
5. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб. : Питер, 2018. 480 с.

References

1. Galushkin A.I. *Sintez mnogoslonykh sistem raspoznavaniya obrazov = Synthesis of multilayer pattern recognition systems*. Moscow: Energiya, 1974. (In Russ.)
2. Khaykin S. *Neyronnye seti. Polnyy kurs. 2-e izd., ispr. = Neural networks. Full course. 2nd ed., corr.* Moscow: Vil'yams, 2006:1104. (In Russ.)
3. Gorbachenko V.I. *Neyroinformatika: konspekt lektiy = Neuroinformatics : lecture notes*. Penza: Penz. gos. ped. un-t im. V. G. Belin-skogo, 2011:81. (In Russ.)
4. Goodfellow Ya., Bengio I., Kurvil' A. *Glubokoe obuchenie = Deep learning*. Moscow: DMK Press, 2017:652. (In Russ.)
5. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie = Deep learning*. Saint Petersburg: Peter, 2018:480. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Иванович Волчихин

доктор технических наук, профессор,
президент
Пензенского государственного университета
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vvi@pnzgu.ru

Vladimir I. Volchikhin

Doctor of technical sciences, professor,
president of the Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационной
безопасности и технологий,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
научный консультант,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Alexander I. Ivanov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of sub-department of technical means
of information security,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
scientific consultant,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Елена Александровна Малыгина

кандидат технических наук, докторант
кафедры технических средств
информационной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsib@pnzgu.ru

Сергей Викторович Качалин

кандидат технических наук,
заместитель начальника отделения,
НПП «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: s.kachalin@gmail.com

Светлана Андреевна Полковникова

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: 1996svetlanaserikova@gmail.com

Elena A. Malygina

Candidate of technical sciences, doctoral student
of the sub-department of technical means
of information security,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sergey V. Kachalin

Candidate of technical sciences,
deputy head of branch,
SPE "Rubin"
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Svetlana A. Polkovnikova

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

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

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

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

УДК 61.13058

doi:10.21685/2307-5538-2021-4-9

АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ У ДЕТЕЙ С ДЕФИЦИТОМ РАЗВИТИЯ

А. П. Назарычев¹, А. Ю. Тычков², Ю. Н. Комкова³, Г. А. Сугрובה⁴

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

³ Институт возрастной физиологии Российской академии образования, Москва, Россия

¹naz_artem@mail.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³julie.komkova@gmail.com, ⁴sugrobovaga@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Социально-экономические и культурные преобразования в обществе неизбежно влияют на ориентиры развития молодого человека, которые зачастую не учитывают индивидуальные особенности процессов роста и развития, что негативно сказывается на психофизиологическом состоянии здоровья: снижается умственная работоспособность, повышается уровень тревожности и гиперактивности. Эффективность использования различных диагностических методов для анализа уровня функционирования физиологических систем организма повышается при междисциплинарном подходе с учетом знаний инженерных, медицинских, биологических и психологических наук. *Материалы и методы.* В работе проведен обзор методов оценки дефицитов развития у детей и подростков посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца, а также предложена оригинальная методика оценки дефицитов развития с применением преобразования Гильберта – Хуанга. *Результаты и выводы.* Представлена методика оценки дефицитов развития у детей и подростков, позволяющая комплексно проследить процесс поиска оптимальных сигнальных маркеров электрокардиосигнала у детей с дефицитами развития. Определение и выбор сигнальных маркеров дефицитов развития основывается на сочетании оптимальных результатов декомпозиции и математического анализа исследуемого электрокардиосигнала.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, вариабельность ритма сердца, дефициты развития, преобразование Гильберта – Хуанга

Для цитирования: Назарычев А. П., Тычков А. Ю., Комкова Ю. Н., Сугрובה Г. А. Адаптивная обработка и анализ электрокардиосигналов у детей с дефицитом развития // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 73–83. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-9

ADAPTIVE PROCESSING AND ANALYSIS OF ELECTROCARDIOSIGNALS IN CHILDREN WITH A DEFICIT OF DEVELOPMENT

A.P. Nazarychev¹, A.Yu. Tychkov², Yu.N. Komkova³, G.A. Sugrobova⁴

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

³ Institute of Developmental Physiology, Russian Academy of Education, Moscow, Russia

¹naz_artem@mail.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³julie.komkova@gmail.com, ⁴sugrobovaga@mail.ru

Abstract. *Background.* Socio-economic and cultural transformations in society inevitably affect the development guidelines of a young person, which often do not take into account the individual characteristics of the processes of growth and development, which negatively affects the psychophysiological state of health: mental performance decreases, the level of anxiety and hyperactivity increases. The effectiveness of using various diagnostic methods to analyze the level of functioning of the physiological systems of the body increases with an interdisciplinary approach taking into ac-

count the knowledge of engineering, medical, biological and psychological sciences. *Materials and methods.* The paper reviews methods for assessing developmental deficits in children and adolescents by means of electrophysiological measurements of heart potentials, and also offers an original method for assessing developmental deficits using the Hilbert-Huang transform. *Results and Conclusions.* A method for assessing developmental deficits in children and adolescents is presented, which allows us to comprehensively trace the process of searching for optimal signal markers of electrocardiosignal in children with developmental deficits. The determination and selection of signal markers of developmental deficits is based on a combination of optimal decomposition results and mathematical analysis of the studied electrocardiosignal.

Keywords: electrocardiosignal, heart rate variability, developmental deficits, Hilbert-Huang transform

For citation: Nazarychev A.P., Tychkov A.Yu., Komkova Yu.N., Sugrobova G.A. Adaptive processing and analysis of electrocardiosignals in children with a deficit of development. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):73–83. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-9

Введение

В современном мире все большую популярность набирают беспроводные, неинвазивные и, главное, безопасные технологии (средства измерений и диагностики основных показателей жизнедеятельности), позволяющие считывать и расшифровывать сигналы организма человека с помощью электронных медицинских устройств. Это и бытовые гаджеты (фитнес-браслеты), и профессиональные медицинские приборы. В основе этих технологий лежит использование датчиков и обработка их сигналов с помощью компьютерного софта, что значительно ускоряет время получения информации о функциональном состоянии различных систем организма. Особо это актуально при их использовании в целях обеспечения комфортной и безопасной жизни детей и подростков, а также для эффективной и оперативной постановки диагностических заключений об отклонениях в состоянии их здоровья.

Социально-экономические и культурные преобразования в обществе неизбежно влияют на ориентиры развития молодого человека, которые зачастую не учитывают индивидуальные особенности процессов роста и развития, что негативно сказывается на психофизиологическом состоянии здоровья: снижается умственная работоспособность, повышается уровень тревожности и гиперактивности [1]. Стремление родителей к сверххранному обучению, мощный информационный поток из Интернета, чрезмерное использование гаджетов, а также применение дистанционных технологий в обучении предъявляют высокие требования к уровню эмоциональной и психологической восприимчивости организма ребенка. Оценка влияния этих факторов на познавательное развитие и функциональное состояние ребенка – актуальная задача современности.

Согласно многочисленным исследованиям, эффективность использования различных диагностических методов для анализа уровня функционирования физиологических систем организма повышается при междисциплинарном подходе с учетом знаний инженерных, медицинских, биологических и психологических наук [2, 3]. Однако, несмотря на десятилетия успешной клинической апробации существующих диагностических процедур, для них можно выявить недостаточную обоснованность отдельных этапов проведения исследований. Во многом это связано с трудностями формализации задач и существенной неопределенностью их условий в каждом конкретном случае.

Оценка дефицитов развития у детей и подростков посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца является наиболее перспективным направлением исследования. Носителем полезной информации биологической сигнальной системы сердца является электрокардиосигнал (ЭКС). Выбор и определение сигнальных маркеров на ЭКС являются главными задачами при разработке эффективных способов и систем оценки дефицитов развития. Анализ известных в настоящее время маркеров, обнаруживаемых на ЭКС, дает возможность увеличить точность постановки диагностического заключения. В зависимости от индивидуальных параметров ребенка и клинической картины маркеры могут различаться. В связи с этим нам представляется актуальным разработать систему адаптивной обработки и анализа ЭКС у детей с дефицитами развития и трудностями обучения.

Наиболее простыми и удобными для использования на практике показателями функционального состояния человека являются вегетативные реакции. Вариабельность ритма сердца (heart rate variability – HRV) – наиболее информативный неинвазивный метод оценки вегетативной регуляции сердечного ритма [4–7].

Вариабельность сердечного ритма (ВСР) представляет собой физиологическое изменение временных интервалов между последовательными сокращениями сердца [8]. Бульбарные, подкорковые центры вегетативной нервной системы (ВНС) и кора головного мозга модулируют сердечный ритм (СР), что вызывает его аperiodические и периодические изменения [9, 10]. Таким образом, исследуя ВСР, имеется возможность сделать выводы о дефицитах функций ВНС. Для оценки ВСР используется ряд методов, которые основаны на определении количественных параметров изменения интервалов между поочередными сокращениями сердца [4].

В последнее время в связи с сохраняющейся тенденцией увеличения числа детей с нарушениями внимания и гиперактивным поведением все более актуальным становится анализ причин дефицита функций программирования, избирательной регуляции и контроля деятельности – управляющих функций мозга (УФ), нарушений мотивационной сферы, снижения общего уровня активации.

С целью оценки гипотезы, что функционирование ВНС отличается у людей с синдромом дефицита внимания/гиперактивности (СДВГ), был проведен обзор литературных данных, посвященный, в том числе анализу частоты сердечных сокращений в различных экспериментальных условиях (состояние покоя, когнитивные задачи и реакция на подкрепляющие или социально-эмоциональные стимулы). Обзор литературы показал дисфункцию ВНС у людей с СДВГ чаще в направлении гиповозбуждения, чем гипervозбуждения, особенно в состоянии покоя и во время задач, требующих регуляции реакции и постоянного внимания [11].

Некоторые исследования показали, что гиповозбуждение в состоянии покоя при СДВГ может быть в основном связано с повышенной активацией парасимпатической нервной системой (ПНС). Например, Wang et al. [12], анализируя показатели частоты variability сердечного ритма (ВСР) обнаружил, что типично развивающиеся дошкольники по сравнению с дошкольниками с признаками невнимательности/гиперактивности проявляют более высокую активность парасимпатической нервной системы. Аналогичные результаты получены и в исследовании de Carvalho et al. [13].

В другом исследовании у детей 7–12 лет с СДВГ показано также снижение общей ВСР с преобладанием активности симпатической нервной системы [14].

Несмотря на большое количество литературных данных о характере variability ритма сердца, адаптивных возможностях и психоэмоциональном состоянии детей и подростков результаты разных авторов противоречивы, что связано с разными методологическими подходами, объединением детей разного возраста в одну группу анализа, разными темпами полового созревания у детей одного возраста и другими факторами, что определяет необходимость применения комплексного подхода к изучению функционального состояния детей подростков.

Регистрация маркеров дефицитов развития на ЭКС

Оценка дефицитов развития посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца является наиболее перспективным направлением исследования. Носителем полезной информации биологической сигнальной системы сердца является электрокардиосигнал.

С технической (математической) точки зрения, ЭКС представляет собой сложноструктурированный и нестационарный сигнал, который трудно описать одной математической функцией. ЭКС состоит из повторяющихся циклов, которые являются комбинациями простых импульсов (маркеров) разной направленности (P, QRS и T). Амплитудно-временные и частотные характеристики маркеров ЭКС достаточно стабильны, однако у различных людей могут иметь различные значения [15].

Выбор и определение сигнальных маркеров на ЭКС являются главными задачами при разработке эффективных способов и систем оценки дефицитов развития. Анализ известных в настоящее время маркеров, обнаруживаемых на ЭКС, дает возможность увеличить точность постановки диагностического заключения. В зависимости от индивидуальных параметров ребенка и клинической картины маркеры могут различаться.

Анализ ВСР признан одним из наиболее информативных неинвазивных методов оценки вегетативной регуляции СР. В настоящее время в работах зарубежных [16, 17] и отечественных [18–20] исследователей представлен обширный материал для оценки изменений показателей ВСР у детей с дефицитами развития.

В работах [21, 22] подтверждается корреляция ВСР с уровнем эмоционального состояния человека. В работе [21] выявлено повышение значения индекса напряжения регуляторных

систем у лиц, испытывающих постоянные эмоциональные перегрузки. Кроме того, отмечают отклонения показателей вегетативного баланса в сторону увеличения активности симпатической составляющей спектра.

В работе [23] указывается, что увеличение ВСР свидетельствует об усилении активности вентралатеральной префронтальной и медиальной коры головного мозга, что сочетается с увеличением активности миндалин головного мозга. Данная зависимость наиболее заметна у молодых людей, по сравнению с испытуемыми старшего возраста.

В работах [24, 25] описывается взаимосвязь лобных долей головного мозга и ВСР. Данные функциональной МРТ показывают, что при физических и ментальных нагрузках наблюдается понижение тока крови в средней лобной извилине совместно с повышением ЧСС. Кроме того, при эмоциональной стимуляции происходит повышение оттока крови в медиальной префронтальной коре [26].

Индивидуальные характерные черты мощности колебаний СР в достаточной мере стационарны и могут повторяться спустя несколько недель или месяцев [27].

В основе параметров ВСР лежит массив RR-интервалов, сформированный в процессе записи ЭКС [28]. Для оценки формы и характеристик распределения RR-интервалов на анализируемом ЭКС применяются геометрические методы. При его реализации производится построение вариационной кривой и осуществляется оценка индекса напряжения регуляторных систем и вариационного размаха [4].

На анализируемом участке времени ВСР можно рассматривать как сумму последовательных временных RR-интервалов. Для получения количественной оценки данной последовательности применяются статистические методы анализа, основными показателями которых являются CV, SDNN (Standard Deviation of the NN interval), pNN 50 (%), RMSSD (Root Mean Square of the Successive Differences) [29].

К примеру, SDNN представляет собой суммарный показатель variability RR-интервалов. В нормальном состоянии, при отсутствии патологий, величина SDNN составляет от 40 до 80 мс. Пониженное значение SDNN свидетельствует о преимущественном влиянии симпатической нервной системы на СР, а его повышенное значение – о преобладании парасимпатических влияний [27].

Для качественного анализа СР как случайного процесса применяется автокорреляционный метод анализа [4]. Данный метод представляет собой график изменения показателей корреляции, по параметрам которого делается вывод о воздействии центрального звена на нервную систему.

Инструментом графического анализа ВСР является корреляционная ритмография, посредством которой оценивается влияние на СР симпатической нервной системы при аритмиях. Сущность данного метода заключается в графическом построении последовательных пар RR-интервалов в двухмерном пространстве [27].

При анализе частотных составляющих спектра волн СР применяются спектральные методы [30], где осуществляется вычисление мощности колебаний RR-интервалов посредством авторегрессионных методов и быстрого преобразования Фурье.

Спектральные методы оценивают продолжительность RR-интервалов различных составляющих спектра СР. По соотношению мощностей спектральных характеристик можно оценить доминирование того или иного механизма регуляции работы сердца [31].

Спектральную плотность мощности сигнала ВСР можно разделить на четыре поддиапазона [27, 30]:

1. Высокочастотный диапазон (High Frequency, HF) от 0,15 до 0,40 Гц, в среднем составляющий до 20 % общей мощности спектра СР. Главным образом отражает влияние на СР парасимпатического отдела ВНС.

2. Низкочастотный диапазон (Low Frequency, LF) от 0,04 до 0,15 Гц, составляющий до 40 % общей мощности спектра СР. Главным образом характеризует воздействие на СР симпатического отдела ВНС.

3. Сверхнизкочастотный диапазон (Very Low Frequency, VLF) от 0,0033 до 0,04 Гц, в норме составляющий до 30 % общей мощности спектра СР. Характеризуется гуморальными воздействиями на СР.

4. Ультранизкочастотный диапазон (Ultra-Low Frequency, ULF) от 0,00003 до 0,0033 Гц, в норме составляющий до 10 % общей мощности спектра СР. Волны данного диапазона характеризуют метаболический и нейрогуморальный уровень регуляции деятельности синусового узла.

Исследования [32] показали, что взаимодействия между составляющими данных диапазонов могут указывать на глубинный патогенез заболеваний. В работе [33] показано, что энтропия между LF и HF может отличать человека с дисфункцией ВНС от нормальных.

По результатам анализа СР спектральным методом рассчитывается индекс централизации IC. Нормальное значение индекса централизации варьируется от 2 до 8 единиц. Также производится вычисление индекса вагосимпатического взаимодействия HF+LF, нормальное значение которого находится в диапазоне от 0,5 до 2,0 единицы.

Точность принятия врачебного решения о наличии дефицитов развития у ребенка посредством применения спектральных методов анализа ВСР ограничена. В литературе различных авторов [4, 34] присутствуют расхождения при вычислении частотных диапазонов спектра, что приводит к постановке неверного заключения. Ошибки в правильных расчетах, как правило, возникают в результате регистрации на сигнале различных сетевых помех и артефактов движения [35].

Для устранения указанных недостатков разрабатываются и совершенствуются адаптивные методы обработки ЭКС, способные подстроиться под индивидуальные особенности и параметры исследуемого сигнала, в том числе в условиях повышенного уровня помех и свободной двигательной активности человека [15]. Наглядным представителем адаптивных методов обработки нелинейных и нестационарных сигналов является преобразование Гильберта – Хуанга [36].

Описание преобразования Гильберта – Хуанга

Преобразование Гильберта – Хуанга является методом частотно-временного анализа сигналов различной природы и позволяет исследовать изменения мгновенных частот и их амплитуд во времени, что является значимым при изучении процессов с меняющимися во времени характеристиками, каким является ЭКС. Преобразование Гильберта – Хуанга основано на разложении (декомпозиции) исследуемого сигнала на амплитудно-временные характеристики (эмпирические моды, ЭМ) по каждому значению частот, присутствующем в сигнале, а также последующем построении спектра Гильберта в системе координат энергия–частота–время [37].

Главным преимуществом преобразования Гильберта – Хуанга является декомпозиция исходного сигнала на конечное число ЭМ. Разложение на ЭМ отличается от разложения на гармонические составляющие в соответствии с классическим спектральным анализом, поскольку каждая полученная ЭМ имеет сложный и индивидуальный (адаптивный) гармонический состав [36].

В результате преобразования Гильберта – Хуанга исследуемого ЭКС выделяется в зависимости от длительности сигнала и наличия на нем помех от 8 до 11 ЭМ. В процессе декомпозиции получается семейство модовых функций, упорядоченных по частоте, где каждая последующая функция имеет более низкую частоту, чем предыдущая [36].

Классическое разложение на ЭМ [38] представляет собой итерационный процесс, состоящий из последовательности блоков.

Блок 1. Идентификация экстремумов исследуемого ЭКС.

Блок 2. Построение верхней и нижней огибающих, аппроксимирующих локальные максимумы и минимумы соответственно.

Блок 3. Определение средней огибающей.

Блок 4. Вычитание из исходного сигнала средней огибающей.

Блок 5. Проверка останова, возврат к предыдущей итерации.

Блок 6. Выделение ЭМ.

Блок 7. Вывод ЭМ.

Результатом преобразования Гильберта – Хуанга исследуемых ЭКС является вывод ЭМ, представленный в системе координат амплитуда–время по каждому значению частот и построение спектра Гильберта в системе координат энергия–частота–время.

Сопоставление амплитудно-временных распределений ЭКС по каждому значению его частоты позволит повысить оперативность и эффективность постановки диагностических заключений о наличии дефицитов развития у ребенка в условиях свободной его двигательной активности.

Методика оценки дефицитов развития

Методика оценки дефицитов развития с применением преобразования Гильберта – Хуанга приведена на рис. 1.

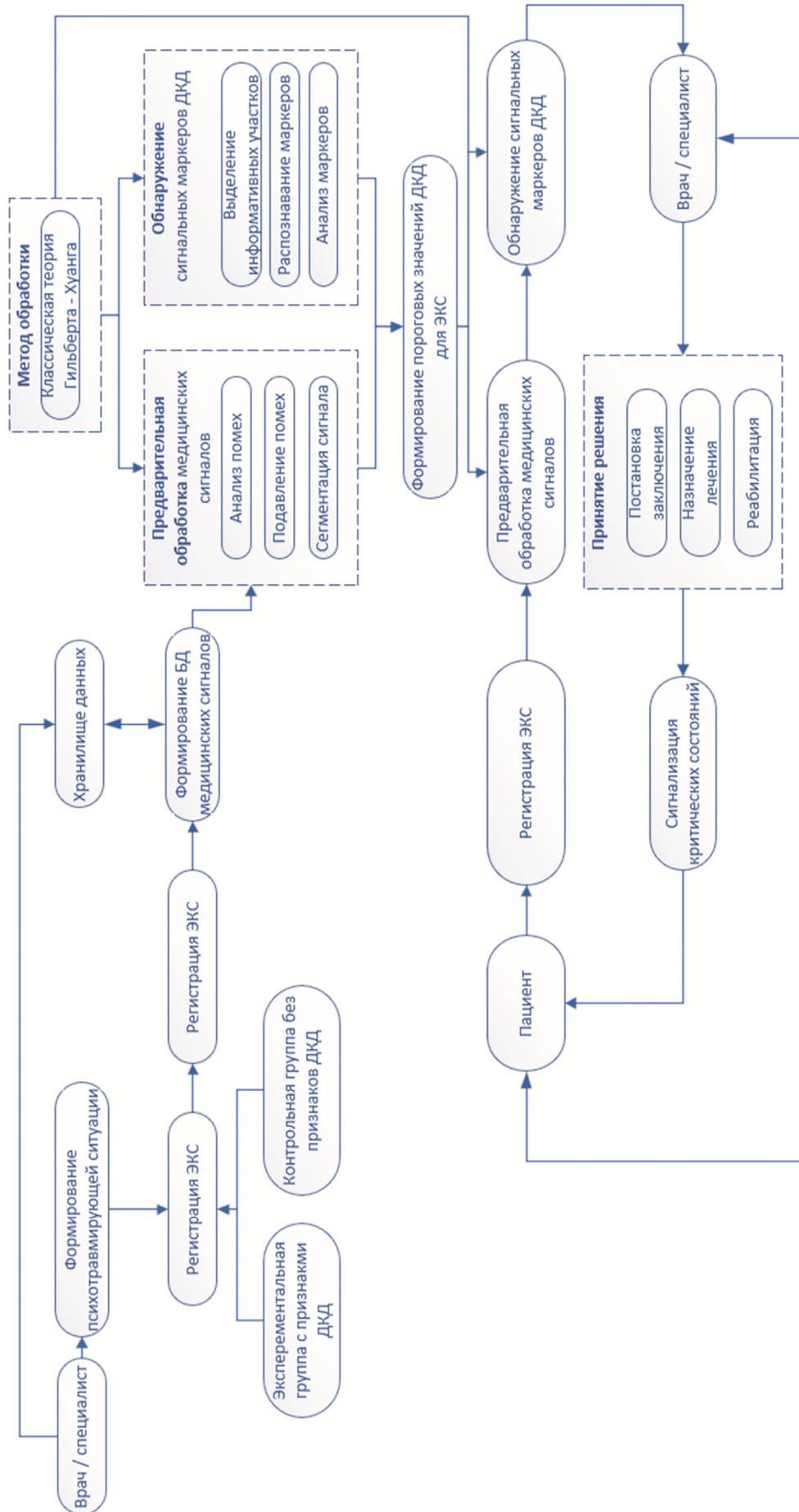


Рис. 1. Методика оценки дефицитов развития с применением преобразования Гильберта – Хуанга

Данная методика является обобщенной и позволяет комплексно проследить процесс поиска оптимальных сигнальных маркеров ЭКС у детей с дефицитами развития:

1. Регистрация/получение ЭКС – загрузка данных с помощью медицинских приборов, баз данных (БД) АРМ врача и Internet.

2. Обработка ЭКС – автоматическое обнаружение, определение вида помех и их подавление, сегментация сигнала.

3. Анализ ЭКС – автоматическое выделение информативных участков и принятие решения об уровне зашумленности исследуемого сигнала.

4. Преобразование Гильберта – Хуанга и формирование пороговых значений дефицитов развития для исследуемого ЭКС.

Определение и выбор сигнальных маркеров дефицитов развития основывается на сочетании оптимальных результатов декомпозиции и математического анализа исследуемого ЭКС.

Анализ ЭКС по результатам комплексного исследования психофизического состояния детей позволит спрогнозировать эффективность произвольной регуляции деятельности, а также выявить детей групп риска и разработать меры по повышению здоровья нации.

Заключение

Оценка дефицитов развития у детей и подростков посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца является наиболее перспективным направлением исследования. Носителем полезной информации биологической сигнальной системы сердца является электрокардиосигнал. В работе проведен обзор методов оценки дефицитов развития у детей и подростков посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца. Повысить достоверность выделения сигнальных маркеров дефицитов развития возможно за счет разработки новых способов поиска скрытых паттернов на физиологических сигналах, а также за счет адаптации метода анализа ЭКС под конкретного пациента, с учетом его индивидуальных особенностей. В работе представлена методика оценки дефицитов развития у ребенка, позволяющая комплексно проследить процесс поиска оптимальных сигнальных маркеров ЭКС у детей с дефицитами развития.

Список литературы

1. Безруких М. М., Мачинская Р. И., Фарбер Д. А. Структурно-функциональная организация развивающегося мозга и формирование познавательной деятельности в онтогенезе ребенка // Физиология человека. 2009. Т. 35, № 6, С. 10–24.
2. Machinskaya R. I., Semenova O. A., Sugrobova G. A. An interdisciplinary approach to analysis of the cerebral mechanisms of learning difficulties in children. experience of studies of children with signs of ADHD // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2015. Vol. 45, № 1. P. 58–73.
3. Лиля Н. Л. Особенности адаптационных возможностей студентов с разными индивидуально-типологическими характеристиками психической деятельности и вегетативной регуляции организма : дис. ... канд. мед. наук. Луганск, 2015. С. 24.
4. Баевский Р. М. Вариабельность сердечного ритма. Медико-физиологические аспекты // Тезисы докладов IV Всерос. симп. с междунар. участием, посвящ. юбилею заслуженного деятеля науки РФ, профессора Романа Марковича Баевского (19–21 ноября 2008 г.). Ижевск, 2008. С. 345.
5. Михайлов В. М. Вариабельность ритма сердца: опыт практического применения. Иваново : Иван. гос. мед. академия, 2002, С. 290.
6. Chiaramonti R., Muscas G. C., Paganin M. [et al.]. Correlations of Topographical EEG Features with Clinical Severity in Mild and Moderate Dementia of Alzheimer Type // Neuropsychobiology. 1997. Vol. 36, № 3. P. 153–158.
7. Sandercock G. Normative values, reliability and sample size estimates in heart rate variability // Clinical Science. 2007. Vol. 113, № 3. P. 129–130.
8. Павлов К. И., Мухин В. Н., Сырцев А. В. [и др.]. Вариабельность сердечного ритма в изучении когнитивных функций и военно-профессиональной адаптации // Медицинский академический журнал. 2017. Т. 17, № 4. С. 7–16.
9. Баевский Р. М. Анализ вариабельности сердечного ритма: история и философия, теория и практика // Клиническая информатика и телемедицина. 2004. Т. 1, № 1. С. 54–64.
10. Ермолаева А. И., Баранова Г. А. Вегетативная нервная система и вегетативные нарушения. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. С. 39.

11. Bellato A., Arora I., Hollis C., Groom M. J. Is autonomic nervous system function atypical in attention deficit hyperactivity disorder (ADHD)? A systematic review of the evidence // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2020. Vol. 108. P. 182–206.
12. Wang T. S., Huang W. L., Kuo T. B. J. [et al.]. Inattentive and hyperactive preschool-age boys have lower sympathetic and higher parasympathetic activity // *The Journal of Physiological Sciences*. 2013. Vol. 63. P. 87–94.
13. de Carvalho T. D., Wajnsztejn R., de Abreu L. C. [et al.]. Analysis of cardiac autonomic modulation of children with attention deficit hyperactivity disorder // *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. 2014. Vol. 10. P. 613–618.
14. Rukmani M. R., Seshadri S. P., Thennarasu K. [et al.]. Heart Rate Variability in Children with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: A Pilot Study // *Ann Neurosci*. 2016. Vol. 23. P. 81–88.
15. Тычков А. Ю. Способы и системы определения сигнальных маркеров психогенных психических расстройств : дис. ... д-ра техн. наук. Пенза, 2019, С. 44.
16. Umetani K., Singer D. H., McCraty R., Atkinson M. Twenty-four hour time domain heart rate variability and heart rate: relations to age and gender over nine decades // *Am. Coll Cardiol*. 1998. Vol. 31, № 3. P. 593–601.
17. McCraty R., Atkinson M., Tomasino D., Bradley R. T. The coherent heart: heart–brain interactions, psychophysiological coherence, and the emergence of system-wide order. Boulder Creek, CA: Institute of Heartmath, 2009. P. 300.
18. Кизько А. П., Кизько Е. А. Подход к физиологической интерпретации результатов спектрального анализа вариабельности сердечного ритма // *Актуальные проблемы физической культуры, спорта и туризма : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2018. С. 473–475.*
19. Кизько А. П., Кизько Е. А. Новый подход к физиологической интерпретации результатов спектрального анализа вариабельности сердечного ритма // *Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта. СПб., 2017. С. 124–136.*
20. Самойлов А. С., Никонов Р. В., Пустовойт В. И., Ключников М. С. Применение методики анализа вариабельности сердечного ритма для определения индивидуальной устойчивости к токсическому действию кислорода // *Спортивная медицина*. 2020. Т. 10, № 3. С. 73–80.
21. Сидоренко Г. И., Комиссарова С. М. Оценка объективных критериев фаз стрессовой реакции при разных уровнях адаптации // *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2008. Т. 7, № 1. С. 91–97.
22. Gazzellini S., Dettori M., Amadori F. [et al.]. Association between Attention and Heart Rate Fluctuations in Pathological Worriers // *Front Hum Neurosci*. 2016. Vol. 10. P. 648.
23. Sakaki M., Yoo H. J., Nga L. [et al.]. Heart rate variability is associated with amygdala functional connectivity with MPFC across younger and older adults // *Neuroimage*. 2016. Vol. 139. P. 44–52.
24. McCraty R., Shaffer F. Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health risk // *Glob. Adv. Health Med*. 2015. Vol. 4, № 1. P. 46–61.
25. Kukanova B., Mravec B. Complex intracardiac nervous system // *Bratisl Lek Listy*. 2006. Vol. 107, № 3. P. 45–51.
26. Critchley H. D., Corfield D. R., Chandler M. P. [et al.]. Cerebral correlates of autonomic cardiovascular arousal: a functional neuroimaging investigation in humans // *Journal of Physiology*. 2000. Vol. 523, № 1. P. 259–270.
27. Новиков Е. М., Стеблецов С. В., Ардашев В. Н. [и др.]. Методы исследования сердечного ритма по данным ЭКГ: вариабельность сердечного ритма и дисперсионное картирование // *Кремлевская медицина. Клинический вестник*. 2019. № 4. С. 81–89.
28. Борисенко Т. Л., Снежицкий В. А., Фролов А. В. Клиническое значение нелинейных параметров вариабельности сердечного ритма у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями // *Журнал Гродненского государственного медицинского университета*. 2020. Т. 18, № 3. С. 223–229.
29. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of pacing and electro-physiology // *Eur. Heart J*. 1996. Vol. 17. P. 354–381.
30. Глухова Е. З., Алиева А. М., Какучая Т. Т. [и др.]. Вариабельность сердечного ритма и методы ее оценки // *Креативная кардиология*. 2009. № 1. С. 76–80.
31. Бахчина А. В., Мухаметов Л. М., Рожнов В. В., Лямин О. И. Спектральный анализ вариабельности сердечного ритма белухи во время действия акустического шума // *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*. 2017. Т. 53, № 1. С. 55–58.
32. Chen M., He A., Feng K. [et al.]. Empirical Mode Decomposition as a Novel Approach to Study Heart Rate Variability in Congestive Heart Failure Assessment // *Entropy*. 2019. Vol. 21. P. 1169.
33. Zheng L., Pan W., Li Y. [et al.]. Use of Mutual Information and Transfer Entropy to Assess Interaction between Parasympathetic and Sympathetic Activities of Nervous System from HRV // *Entropy*. 2017. Vol. 19. P. 489.

34. Зиеп Буй Минь, Таратухин Е. О. Возможности методики variability сердечного ритма // Российский кардиологический журнал. Т. 16, № 6. С. 69–75.
35. Сорокин А. А. Разработка алгоритма оценки качества электрокардиосигнала // Научные достижения и открытия современной молодежи. Пенза, 2017. С. 1355–1357.
36. Омпоков В. Д., Бороноев В. В. Исследование частотно-временных характеристик пульсовых сигналов с помощью преобразования Гильберта – Хуанга // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5. С. 8.
37. Омпоков В. Д., Бороноев В. В. Частотно-временной анализ пульсовых сигналов на основе преобразования Гильберта – Хуанга // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 8. С. 7.
38. Влацкая Л. А., Семенова Н. Г., Греков Э. Л. Сравнение алгоритмов модовой декомпозиции при исследовании несинусоидальных электрических сигналов // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 12. С. 51–55.

References

1. Bezrukikh M.M., Machinskaya R.I., Farber D.A. Structural and functional organization of the developing brain and the formation of cognitive activity in the ontogenesis of a child. *Fiziologiya cheloveka = Human physiology*. 2009;35(6):10–24. (In Russ.)
2. Machinskaya R.I., Semenova O.A., Sugrobova G.A. An interdisciplinary approach to analysis of the cerebral mechanisms of learning difficulties in children. experience of studies of children with signs of ADHD. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2015;45(1):58–73.
3. Lila N.L. Features of adaptive capabilities of students with different individual-typological characteristics of mental activity and vegetative regulation of the body. PhD dissertation. Lugansk, 2015:24. (In Russ.)
4. Baevskiy R.M. Medical and physiological aspects. *Tezisy dokladov IV Vseros. simp. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. yubileyu zaslužennogo deyatelya nauki RF, professora Romana Markovicha Baevskogo (19–21 noyabrya 2008 g.) = Abstracts of the IV All-Russian reports. simp. from the international. participation, dedication. Anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, Professor Roman Markovich Bayevsky (November 19–21, 2008)*. Izhevsk, 2008:345. (In Russ.)
5. Mikhaylov V.M. *Variabel'nost' ritma serdtsa: opyt prakticheskogo primeneniya = Heart rate variability: practical application experience*. Ivanovo: Ivan. gos. med. akademiya, 2002:290. (In Russ.)
6. Chiaramonti R., Muscas G.C., Paganin M. [et al.]. Correlations of Topographical EEG Features with Clinical Severity in Mild and Moderate Dementia of Alzheimer Type. *Neuropsychobiology*. 1997;36(3):153–158.
7. Sandercock G. Normative values, reliability and sample size estimates in heart rate variability. *Clinical Science*. 2007;113(3):129–130.
8. Pavlov K.I., Mukhin V.N., Syrtsev A.V. [et al.]. Heart rate variability in the study of cognitive functions and military-professional adaptation. *Meditsinskiy akademicheskij zhurnal = Medical Academic Journal*. 2017;17(4):7–16. (In Russ.)
9. Baevskiy R.M. Analysis of heart rate variability: history and philosophy, theory and practice. *Klinicheskaya informatika i telemeditsina = Clinical informatics and telemedicine*. 2004;1(1):54–64. (In Russ.)
10. Ermolaeva A.I., Baranova G.A. *Vegetativnaya nervnaya sistema i vegetativnye narusheniya = Autonomic nervous system and autonomic disorders*. Penza: Izd-vo PGU, 2015:39. (In Russ.)
11. Bellato A., Arora I., Hollis C., Groom M.J. Is autonomic nervous system function atypical in attention deficit hyperactivity disorder (ADHD)? A systematic review of the evidence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2020;108:182–206.
12. Wang T.S., Huang W.L., Kuo T.B.J. [et al.]. Inattentive and hyperactive preschool-age boys have lower sympathetic and higher parasympathetic activity. *The Journal of Physiological Sciences*. 2013;63:87–94.
13. de Carvalho T.D., Wajnsztejn R., de Abreu L.C. [et al.]. Analysis of cardiac autonomic modulation of children with attention deficit hyperactivity disorder. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. 2014;10:613–618.
14. Rukmani M.R., Seshadri S.P., Thennarasu K. [et al.]. Heart Rate Variability in Children with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: A Pilot Study. *Ann Neurosci*. 2016;23:81–88.
15. Tyckov A.Yu. Methods and systems for identifying signal markers psychogenic mental disorders. DSc dissertation. Penza, 2019:44. (In Russ.)
16. Umetani K., Singer D.H., McCraty R., Atkinson M. Twenty-four hour time domain heart rate variability and heart rate: relations to age and gender over nine decades. *Am. Coll Cardiol*. 1998;31(3):593–601.
17. McCraty R., Atkinson M., Tomasino D., Bradley R.T. *The coherent heart: heart–brain interactions, psychophysiological coherence, and the emergence of system-wide order*. Boulder Creek, CA: Institute of Heartmath, 2009:300.
18. Kiz'ko A.P., Kiz'ko E.A. Approach to the physiological interpretation of the results of spectral analysis of heart rate variability. *Aktual'nye problemy fizicheskoy kul'tury, sporta i turizma: materialy XII Mezhdunar.*

- nauch.-prakt. konf. = Actual problems of physical culture, sports and tourism : materials of the XII International scientific and practical conference. Ufa, 2018:473–475. (In Russ.)*
19. Kiz'ko A.P., Kiz'ko E.A. A new approach to the physiological interpretation of the results of spectral analysis of heart rate variability. *Uchenye zapiski universiteta imeni P. F. Lesgafta = Scientific Notes of the P. F. Lesgaft University*. Saint Petersburg, 2017:124–136. (In Russ.)
 20. Samoylov A.S., Nikonov R.V., Pustovoyt V.I., Klyuchnikov M.S. Application of the methodology of analysis of heart rate variability to determine individual resistance to the toxic effects of oxygen. *Sportivnaya meditsina = Sports medicine*. 2020;10(3):73–80. (In Russ.)
 21. Sidorenko G.I., Komissarova S.M. Evaluation of objective criteria of stress reaction phases at different levels of adaptation. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika = Cardiovascular therapy and prevention*. 2008;7(1):91–97. (In Russ.)
 22. Gazzellini S., Dettori M., Amadori F. [et al.]. Association between Attention and Heart Rate Fluctuations in Pathological Worriers. *Front Hum Neurosci*. 2016;10:648.
 23. Sakaki M., Yoo H.J., Nga L. [et al.]. Heart rate variability is associated with amygdala functional connectivity with MPFC across younger and older adults. *Neuroimage*. 2016;139:44–52.
 24. McCraty R., Shaffer F. Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health risk. *Glob. Adv. Health Med*. 2015;4(1):46–61.
 25. Kukanova B., Mravec B. Complex intracardiac nervous system. *Bratisl Lek Listy*. 2006;107(3):45–51.
 26. Critchley H.D., Corfield D.R., Chandler M.P. [et al.]. Cerebral correlates of autonomic cardiovascular arousal: a functional neuroimaging investigation in humans. *Journal of Physiology*. 2000;523(1):259–270.
 27. Novikov E.M., Stebletsov S.V., Ardashev V.N. [et al.]. Methods of heart rate research according to ECG data: heart rate variability and dispersion mapping. *Kremlevskaya meditsina. Klinicheskiy vestnik = Kremlin Medicine. Clinical Bulletin*. 2019;(4):81–89. (In Russ.)
 28. Borisenko T.L., Snezhitskiy V.A., Frolov A.V. Clinical significance of nonlinear parameters of heart rate variability in patients with cardiovascular diseases. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Journal of Grodno State Medical University*. 2020;18(3):223–229. (In Russ.)
 29. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of pacing and electro-physiology. *Eur. Heart J*. 1996;17:354–381.
 30. Glukhova E.Z., Alieva A.M., Kakuchaya T.T. [et al.]. Heart rate variability and methods of its assessment. *Kreativnaya kardiologiya = Creative Cardiology*. 2009;(1):76–80. (In Russ.)
 31. Bakhchina A.V., Mukhametov L.M., Rozhnov V.V., Lyamin O.I. Spectral analysis of heart rate variability of beluga whales during the action of acoustic noise. *Zhurnal evolyutsionnoy biokhimi i fiziologii = Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2017;53(1):55–58. (In Russ.)
 32. Chen M., He A., Feng K. [et al.]. Empirical Mode Decomposition as a Novel Approach to Study Heart Rate Variability in Congestive Heart Failure Assessment. *Entropy*. 2019;21:1169.
 33. Zheng L., Pan W., Li Y. [et al.]. Use of Mutual Information and Transfer Entropy to Assess Interaction between Parasympathetic and Sympathetic Activities of Nervous System from HRV. *Entropy*. 2017;19:489.
 34. Ziep Buy Min', Taratukhin E.O. Possibilities of heart rate variability methodology. *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian Cardiological Journal*. 2011;16(6):69–75. (In Russ.)
 35. Sorokin A.A. Development of an algorithm for assessing the quality of an electrocardiosignal. *Nauchnye dostizheniya i otkrytiya sovremennoy molodezhi = Scientific achievements and discoveries of modern youth*. Penza, 2017:1355–1357. (In Russ.)
 36. Ompokov V.D., Boronoev V.V. Investigation of the frequency-time characteristics of pulse signals using the Hilbert -Huang transform. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2017;(5):8. (In Russ.)
 37. Ompokov V.D., Boronoev V.V. Time-frequency analysis of pulse signals based on the Hilbert -Huang transform. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2019;(8):7. (In Russ.)
 38. Vlatskaya L.A., Semenova N.G., Grekov E.L. Comparison of mode decomposition algorithms in the study of non-sinusoidal electrical signals. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2019;(12):51–55. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Артем Павлович Назарычев

студент,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: naz_artem@mail.ru

Artyom P. Nazarychev

Student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Тычков

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

Alexander Yu. Tychkov

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

Юлия Николаевна Комкова

кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
возрастной психофизиологии
и диагностики развития,
Институт возрастной физиологии
Российской академии образования
(Россия, г. Москва, ул. Погодинская, 8)
E-mail: julie.komkova@gmail.com

Yulia N. Komkova

Candidate of biological sciences,
senior researcher of the laboratory of developmental
psychophysiology and development diagnostics,
Institute of Age Physiology,
Russian Academy of Education
(8 Pogodinskaya street, Moscow, Russia)

Галина Алексеевна Сугрובה

кандидат биологических наук,
доцент кафедры общей биологии и биохимии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sugrobovaga@mail.ru

Galina A. Sugrobova

Candidate of biological sciences,
associate professor of the sub-department
of general biology and biochemistry,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 16.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.08.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021

ПРИМЕНЕНИЕ VR ДЛЯ КОНТРОЛЯ И КОРРЕКЦИИ ФОБИЧЕСКИХ ТРЕВОЖНЫХ РАССТРОЙСТВ

А. Ю. Тычков¹, Д. С. Чернышов², Н. С. Бофанова³,
А. К. Алимуратов⁴, Д. Л. Овчинников⁵, А. М. Сотников⁶

^{1,2,3,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹tychkov-a@mail.ru, ²deniska_1980_13@mail.ru, ³box5887@mail.ru,
⁴alansapfir@yandex.ru, ⁵dmitry_ovch@mail.ru, ⁶sanchess2015@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Виртуальная реальность (VR) находит широкое применение в средствах медицинского назначения, в том числе для оценки и коррекции фобических тревожных расстройств. В работе предложена оригинальная методика контроля и коррекции фобических тревожных расстройств с применением виртуальной реальности. *Материалы и методы.* В работе проведен обзор и критический анализ способов и средств оценки тревожно-фобических расстройств посредством регистрации и цифровой обработки физиологических сигналов, а также приспособления различных сцен виртуальной реальности к текущему состоянию пользователя. *Результаты и выводы.* Представлена методика исследования фобических тревожных расстройств в среде VR, позволяющая адаптировать сцены VR под конкретного пользователя с учетом его индивидуальных особенностей и параметров поведения. Адаптация сцен VR осуществляется за счет подбора оптимального набора скрытых сигнальных паттернов, зарегистрированных на ЭКГ и ЭЭГ сигналах.

Ключевые слова: виртуальная реальность, фобические расстройства, цифровое пространство

Для цитирования: Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Бофанова Н. С., Алимуратов А. К., Овчинников Д. Л., Сотников А. М. Применение VR для контроля и коррекции фобических тревожных расстройств // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 84–92. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-10

VR IMPLEMENTATION FOR CONTROL AND CORRECT PHOBIC ANXIETY DISORDERS

A.Yu. Tychkov¹, D.S. Chernyshov², N.S. Bofanova³,
A.K. Alimuradov⁴, D.L. Ovchinnikov⁵, A.M. Sotnikov⁶

^{1,2,3,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia
¹tychkov-a@mail.ru, ²deniska_1980_13@mail.ru, ³box5887@mail.ru,
⁴alansapfir@yandex.ru, ⁵dmitry_ovch@mail.ru, ⁶sanchess2015@yandex.ru

Abstract. *Background.* Virtual reality (VR) is widely used in medical devices, including the assessment and correction of phobic anxiety disorders. The paper proposes an original technique for controlling and correcting phobic disorders from practical reality. *Materials and methods.* The paper provides a review and critical analysis of the methods and means for assessing anxiety-phobic disorders through the registration and digital processing of physiological signals, as well as the adaptation of various scenes of virtual reality to the current state of the user. *Results and Conclusions.* The article presents a methodology for studying phobic anxiety disorders in the VR environment, which makes it possible to adapt VR scenes for a specific user, taking into account his individual characteristics and behavior parameters. Adaptation of VR scenes is carried out by selecting the optimal set of hidden signal patterns recorded on the ECG and EEG signals.

Keywords: virtual reality, phobic disorders, digital space

For citation: Tychkov A.Yu., Chernyshov D.S., Bofanova N.S., Alimuradov A.K., Ovchinnikov D.L., Sotnikov A.M. VR implementation for control and correct phobic anxiety disorders. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):84–92. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-10

Введение

На современном этапе развития общества наблюдается тенденция к развитию и всестороннему применению информационных технологий в различных сферах жизнедеятельности человека. В условиях пандемии COVID-19 у населения возник наибольший запрос на программные продукты и системные решения в области удаленной коммуникации, видеотрансляции, хранения и передачи данных. Данное явление стало особенно актуально для развития «Цифровой медицины». Современные информационные технологии позволили врачу и пациенту оперативно взаимодействовать совместно на расстоянии друг от друга в режиме реального времени. Электронная почта, мессенджеры и программно-аппаратные средства для медицинских приложений стали значительно лидировать на рынке востребованных услуг.

Виртуальная реальность как инструмент развития информационных технологий находит все большее применение в сферах медицины при разработке анатомических и диагностических симуляторов, для тренировки первичных навыков в хирургии и стоматологии.

Особое внимание заслуживает вопрос лечения с помощью технологии VR тревожно-фобических расстройств, частота встречаемости которых в популяции значительно выросла в связи с негативными последствиями коронавирусной инфекции. Это необходимо для улучшения качества жизни трудоспособного населения, обеспечения восстановления их работоспособности, что является важным для восстановления экономики всех стран мира [1].

Виртуальная реальность

Виртуальная реальность (VR) – это искусственно созданное представление реального мира в цифровом виде. VR создает эффекты, проецируемые на сознание человека и позволяют испытывать ощущения, максимально приближенные к реальным. Пользователями VR являются более 40 млн человек в мире (2019 – 35 млн чел., 2020 – 42 млн чел.) [2].

Технология VR прошла длинный путь от первых экспериментов в 50-х гг. XX в. до современных беспроводных шлемов в 20-х гг. XXI в. В настоящее время рынок виртуальных устройств формируется следующими компаниями-производителями: Epson BT-200, Google Glass, Oculus Rift, HTC Vive, Microsoft HoloLens, Lumus dk-32, Samsung GearVR, Facebook, Sony, Nokia и др. Публикационная и патентная активность данных организаций позволяет выделить четыре группы производителей, характеризующиеся как центры прироста нового знания в сфере VR, научно-образовательные центры мирового уровня, динамично развивающиеся подразделения R&D. В качестве стран публикации лидирующие позиции в 2020 г. в данной области занимают исследователи США (37 % рынка интеллектуальной собственности), Китай (31 % рынка интеллектуальной собственности), Япония (16 % рынка интеллектуальной собственности) и Южная Корея (11 % рынка интеллектуальной собственности). Россия в сегменте VR пока занимает не более 5 % мирового рынка интеллектуальной собственности [3].

Решением вопросов проектирования различных методик и систем медицинского назначения с использованием VR занимаются следующие научные школы: Московский государственный университет (Ю. Зинченко), Самарский государственный медицинский университет (В. Пятин); Университет Дьюка, США (С. Strabmann); INRIA, Франция (А. Rizzo); Университет Токио, Япония (S. Badia); Университет Фрайбурга, Германия (D. Freeman) и многие другие.

С. Strabmann, S. Eimler и другие ученые исследовали влияние VR при алкогольной зависимости и пищевых отравлениях [4]. S. Jerdan, M. Grindle и другие исследователи оценивали психометрические показатели человека при наличии фобических расстройств (страха выступлений, пауков, высоты, замкнутого пространства и др.) [5]. S. Badia, V. Quintero и иные разработчики проводили исследования VR для диагностики и терапии посттравматического стрессового расстройства и депрессии [6]. Однако информация о представленных решениях ограничена элементарными сценами, без адаптации к человеку. Отмечая высокую значимость трудов известных специалистов и наличие разработанных подходов к рассмотрению отдельных вопросов в области применения VR для оценки и коррекции тревожно-фобических расстройств, до настоящего времени существует огромный пробел в решении задач адаптации моделируемых сцен VR к индивидуальным особенностям поведения человека.

VR должна стать уникальным инструментом для создания новых методик и систем, обеспечивающих приспособление сцен VR к текущему состоянию пользователя.

Оценка состояния человека с фобическими тревожными расстройствами

Согласно Международной классификации болезней 10 пересмотра (МКБ-10) фобии относятся к разделу F4 (невротические, связанные со стрессом и соматоформные расстройства). Рубрику «фобические тревожные расстройства» (F40 по МКБ-10) составили агорафобия (F40.0), социальные фобии (F40.1), специфические (изолированные) фобии (F40.2), другие фобические тревожные расстройства (F40.8), фобическое тревожное расстройство неуточненное (F40.9).

Согласно литературным данным [7], около 12 % населения земного шара (почти миллиард человек) имеют различные фобии, распространенные среди населения любого возраста. Терапией клинических форм фобических тревожных расстройств занимаются психиатры, но многие пациенты изначально обращаются к неврологам, терапевтам, врачам общей практики. Сложная задача для врача общемедицинского профиля – диагностика начальных проявлений тревожно-фобических расстройств, так как жалобы пациентов носят неспецифический характер и у врачей-специалистов недостаточно объективных инструментальных методов диагностики.

Фобия – иррациональный страх, неконтролируемый человеком, или устойчивое чувство тревоги в ситуациях или в ожидании определенного объекта, характерной особенностью является предметность, т.е. направленность страха на тот или иной объект. Известны различные фобические расстройства: страх, связанный с животными или насекомыми (кинофобия, страх собак), естественными природными силами (лилапсофобия, боязнь ураганов), боязнь определенных ситуаций или обстановки, например, клаустрофобия (страх замкнутых пространств) или другие фобии, например связанные со здоровьем, нозофобия (страх заболеть каким-либо заболеванием), лиссофобия (страх иметь психическое расстройство), танатофобия (навязчивый страх смерти) и др. [1, 8, 9].

В ходе взаимодействия с психотравмирующей ситуацией человек испытывает страх определенных ситуаций или внешних объектов, которые реальной опасности для него не представляют, поэтому человек избегает таких ситуаций или, преодолевая чувство страха, переносит их [8].

Страх – одна из древних и сильных эмоций, которые присущи всем людям, помогая проявлять активность в сложной критической ситуации. При страхе у человека происходит активация симпатической нервной системы, которая оказывает воздействие на все системы внутренних органов: учащается частота сердечных сокращений, расширяются зрачки, тормозится активность пищеварительных желез, активизируется работа эндокринной системы [1].

Пациенты, имеющие тревожно-фобические расстройства, согласно клиническим рекомендациям, поддаются комплексной оценке, включающей физикальное обследование (наружный осмотр, определение роста и массы тела, уровня физического развития, состояния кожных покровов, измерение пульса, артериального давления, лабораторную диагностику, общий анализ крови с исследованием лейкоцитарной формулы, биохимический анализ крови, общий анализ мочи, анализ крови на гормоны щитовидной железы) [10]. Также проводится инструментальная диагностика, включающая проведение электроэнцефалографии, электрокардиографии, проведение магнитно-резонансной томографии головного мозга.

Результатом оценки деятельности сердечно-сосудистой системы является вывод значений частоты сердечных сокращений и вариабельности сердечного ритма. Как правило, наличие страхов и переживаний вызывают у человека увеличение частоты сердечных сокращений более чем на 40 ударов в минуту в сравнении с нормальным значением, достигая при этом 120 и более ударов в минуту [11]. В свою очередь, вариабельность сердечного ритма представляет собой физиологическое изменение временных интервалов между последовательными сокращениями сердца [12].

В качестве источника информации об активизации нейронов головного мозга на внешний раздражитель выступает электроэнцефалографический сигнал, который регистрируется с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ) [13]. ЭЭГ преимущественно отражает медленные колебания мембранного потенциала нервных и глиальных клеток коры головного мозга, вызываемые воздействием нейромедиаторов. Каждое эмоциональное состояние сопровождается периодичностью появления на ЭЭГ определенных сигнальных паттернов и ритмов: дельта, тета, альфа, бета. Исследование частотных ритмов ЭЭГ показало [14], что амплитудное значение

отношения альфа/бета уменьшается в период фобических расстройств. Меньшее значение отношения альфа/бета волн означает больший процент эмоциональной активности. Также в доступной литературе отмечается [8], что негативные эмоции способствуют усилению тета-ритмов преимущественно в правом полушарии головного мозга, а сила эмоций показывает отрицательную связь между диапазонами дельта- и альфа-ритмов, более выраженную в центральных и передних отделах обоих полушарий головного мозга.

В работе [15] утверждается, что понимание физиологических сигналов становится важным аспектом в повседневной жизнедеятельности, влияющим на вербальное и невербальное поведение человека. С развитием технологий интерфейса мозг-компьютер [16] и нейровизуализации [17] стало возможным беспроводным путем и удаленно фиксировать сигналы головного мозга, что позволяет делать выводы об психологических и психических изменениях поведения человека.

Согласно клиническим рекомендациям Российского общества психиатров для пациентов с тревожно-фобическими расстройствами, необходимо проведение экспериментально-психологической диагностики, включающей использование различных шкал и опросников: шкала тревоги Гамильтона, шкала тревоги Бека, интегративный тест тревожности, шкала Бека, стандартизированный клинический личностный опросник ММРІ, опросник для исследования личностных убеждений «Personal Beliefs Test», многомерная шкала перфекционизма, а также рекомендуется использование методик для психологической диагностики факторов риска психической дезадаптации и методик для психологической диагностики системы значимых отношений [8, 9].

Важное значение в лечении пациентов с тревожно-фобическими расстройствами имеют психотерапевтические методы: релаксационные методы психотерапии, использование методик на основе принципа биологической обратной связи, когнитивно-поведенческая терапия, использование личностно-ориентированной психотерапии [8].

Внедрение методик психотерапии в виртуальную среду позволит создать методику и систему адаптивной оценки и коррекции тревожно-фобических расстройств человека. Технология VR позволит оказывать более эффективное воздействие на человека, потому что погружение в мир виртуальной реальности станет возможным не только за счет воображения пациента, но и благодаря дополнительным зрительным, слуховым, тактильным стимулам, генерируемым с помощью оборудования VR.

Программно-аппаратные средства VR в лечении фобических тревожных расстройств

В условиях бурного развития информационных технологий и цифровизации населения создаются различные программно-аппаратные комплексы, системы и базы данных для VR в медицинском секторе.

Известны базы данных VR с моделями различных эмоциональных страхов и переживаний, таких как большая высота, полет на самолете и т.д. Примером таких баз служит C2Phobia, которая разработана специалистами в области психического здоровья, психиатрами, психологами и психотерапевтами. Используя гарнитуру VR, пациент постепенно попадает в анксиогенные ситуации. C2Phobia признана медицинским устройством, полноценным терапевтическим программным обеспечением. Следующая база данных PSIOUS предоставляет анимированные и живые среды VR и дополненной реальности (AR), а также 360-градусные видеоролики для лечения фобических расстройств. PSIOUS содержит 70 сцен VR. Следующая, Stim Response Virtual Reality предоставляет широкий спектр виртуальных миров для лечения акрофобии, аэрофобии и социальных фобий, а также для синхронизации физиологических данных пациента.

Известны также готовые системы, позволяющие проводить коррекцию фобических расстройств. Virtually Better – это система, доступная для кабинета терапевта, которая предназначена для предоставления терапевтических приложений, лечения фобий, беспокойства при общении, связанных с болевыми посттравматическими стрессовыми расстройствами, а также наркомании или алкогольной зависимости. Bravemind использовалась для лечения солдат, служивших в Ираке и Афганистане с тревожными расстройствами. Limbix содержит интерактивные сцены, состоящие из панорамных изображений и видео, которые терапевт может изменять в режиме реального времени.

Одними из самых популярных настольных приложений, доступных для гарнитур Oculus Rift и HTC Vive, являются The Climb, Ritchie's Plank Experience, Arachnophobia и Limelight, которые позволяют преодолеть страх высоты, арахнофобии, выступления с лекциями и презентациями.

Несмотря на значительное количество готовых программно-аппаратных решений, присутствующих на рынке VR для медицины, в том числе оценки и коррекции фобических расстройств, существует явный пробел в области приспособления известных и вновь разрабатываемых сцен VR к каждому конкретному пациенту. Человек индивидуален и обладает своим внутренним набором кодовых комбинаций, обеспечивающих бесперебойную работу биологических сигнальных систем организма. Однако когда человек попадает в экстремальную ситуацию, он не всегда способен контролировать свои чувства, страхи, переживания. Кроме того, каждый человек имеет свой порог восприимчивости. Следовательно, врач и пациент должны иметь объективный инструмент оценки уровня фобических расстройств конкретного человека, без нанесения ему дополнительного дискомфорта. В качестве такого инструмента может выступить оригинальная методика и система беспроводной регистрации и эффективной обработки физиологических сигналов, носителями которых являются центральная нервная и сердечно-сосудистая системы.

Методика исследования фобических тревожных расстройств в среде виртуальной реальности

На основании проведенного обзора и анализа известных источников авторами сделаны вывод о необходимости формирования нового подхода к оценке и коррекции фобических тревожных расстройств в период погружения в среду VR. В работе предложена методика исследования фобических расстройств в среде виртуальной реальности (рис. 1), которая позволит повысить достоверность контроля поведения человека в период проявления фобических расстройств за счет разработки новых способов поиска скрытых паттернов на физиологических сигналах, а также за счет адаптации сцен VR под конкретного пользователя, с учетом его индивидуальных особенностей и параметров поведения.

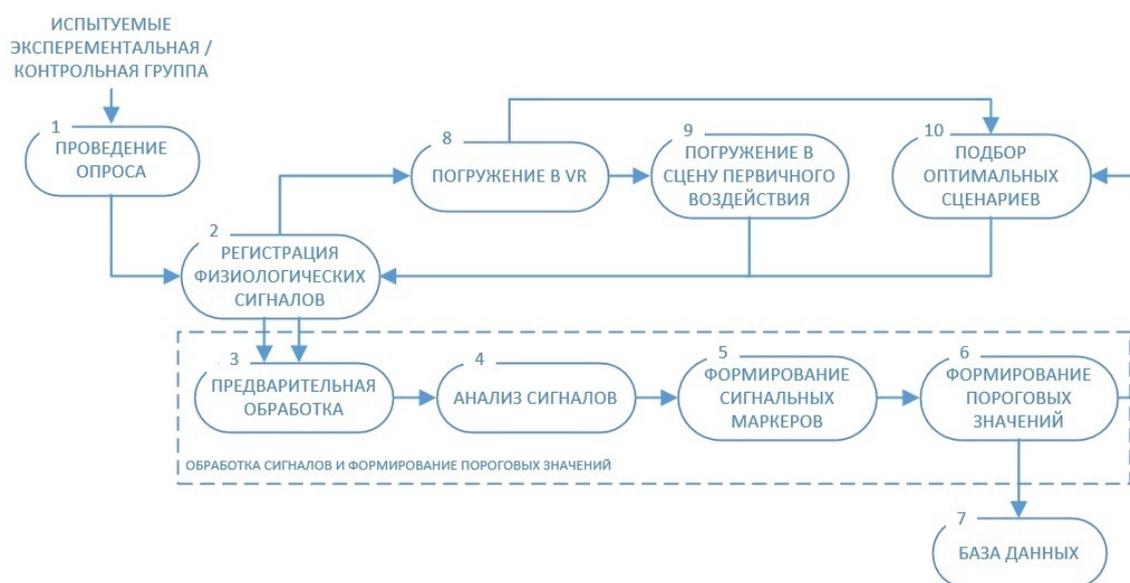


Рис. 1. Методика исследования фобических тревожных расстройств в среде виртуальной реальности

С целью проведения адекватного эксперимента и подтверждения работоспособности представленной методики исследования фобических тревожных расстройств в среде виртуальной реальности на первом этапе ее работы формируется выборка пациентов (испытуемых), представляющих собой контрольную и экспериментальную группы. Регистрация данных пациентов может быть осуществлена на базе лечебно-профилактических учреждений или в специализированной лаборатории. Коллектив авторов обладает необходимыми ресурсами для

подготовки выборки испытуемых для проведения исследования. Проведение методологического исследования будет осуществляться на базе научно-технологической лаборатории «Биомедицинские и когнитивные технологии» Пензенского государственного университета.

По результатам формирования репрезентативной выборки испытуемых каждому предоставляется возможность проведения опроса (тестирования) на предмет наличия конкретных фобий (блок 1), описание которых было приведено в разделе выше. В ходе каждого опроса, испытуемому будет предоставлено не менее 15 вопросов. При положительном ответе на вопрос испытуемый оценивает интенсивность переживаний по 10-балльной шкале.

На следующем этапе осуществляется регистрация физиологических сигналов (блок 2), в качестве источника информации выступают ЭКГ и ЭЭГ сигналы, отражающие изменения в сердечно-сосудистой и центральной нервной системах. Регистрация осуществляется посредством 12-канального для ЭКГ и 24-канального для ЭЭГ устройства компании Нейрософт. Таким образом, в результате исследования с каждого испытуемого будет регистрироваться не менее 26 физиологических сигналов. Регистрация ЭКГ и ЭЭГ сигналов осуществляется для контрольной и экспериментальной групп в период фоновой и активной фаз. Результаты регистрации заносятся в хранилище данных для последующего анализа и обработки результатов измерений врачом или специалистом.

Далее осуществляется предварительная обработка зарегистрированных данных на предмет анализа и подавления помех и артефактов в сигналах (блок 3), сегментации на составные части с целью выделения информативно значимых параметров, а также выделение информативных участков исследуемых сигналов (блок 4), поиск и распознавание скрытых паттернов (блок 5) с целью формирования пороговых значений для различных состояний пациента в период фобических расстройств (блок 6). Далее все данные заносятся в базу данных (блок 7).

На следующем этапе осуществляется погружение испытуемого в один из сценариев воздействия в системе виртуальной реальности (блок 8) с дополнительной параллельной регистрацией тех же физиологических данных, что были описаны ранее. В результате погружения в среду виртуальной реальности испытуемому предоставляется сцена первичного воздействия (блок 9). В данной сцене испытуемый будет испытывать определенный дискомфорт и страхи, провоцируемые средой VR и контролируемые врачом или специалистом. Как было отмечено ранее, на каждом этапе погружения в среду VR осуществляется параллельная регистрация физиологических сигналов, обработка которых позволит врачу или специалисту сделать вывод об изменении пороговых значений скрытых паттернов фобических тревожных расстройств и подбора оптимальных сценариев воздействия VR для осуществления оценки и коррекции фобических расстройств.

Таким образом, представленная методика исследования фобических тревожных расстройств в среде VR позволит создать предпосылки для разработки беспроводной и бесконтактной регистрации в условиях свободной двигательной активности пациента биотехнической системы оперативной оценки и коррекции фобических расстройств в условиях VR.

Заключение

Виртуальная реальность (VR) является оригинальным инструментом для создания новых методик и систем, обеспечивающих приспособление сцен VR к текущему состоянию пользователя в условиях наличия фобических тревожных расстройств. Человек индивидуален и обладает своим внутренним набором кодовых комбинаций, регистрация которых возможна посредством физиологических сигналов, носителями которых являются центральная нервная и сердечно-сосудистая системы. В работе проведен обзор и критический анализ способов и средств оценки фобических тревожных расстройств посредством физиологических сигналов и сцен виртуальной реальности. Повысить достоверность контроля поведения человека в период проявления фобических расстройств возможно за счет разработки новых способов поиска скрытых паттернов на физиологических сигналах, а также за счет адаптации сцен VR под конкретного пользователя, с учетом его индивидуальных особенностей и параметров поведения. В работе представлена методика исследования фобических тревожных расстройств в среде VR, позволяющая создать предпосылки для разработки беспроводной и бесконтактной регистрации в условиях свободной двигательной активности пациента биотехнической системы оперативной оценки и коррекции фобических расстройств в условиях VR.

Список литературы

1. Корабельникова Е. А. Тревожные расстройства в условиях пандемии COVID-19 // Медицинский вестник Северного Кавказа. 2021. № 16. С. 79–85.
2. Скворцов К. А. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения // Моя профессиональная карьера. 2019. Т. 3, № 5. С. 183–187
3. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «технологии виртуальной и дополненной реальности». М., 2019. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019npt.pdf>
4. Straßmann C., Arntz A., Eimler S. C. Under The (Plastic) Sea-Sensitizing People Toward Ecological Behavior Using Virtual Reality Controlled by Users' Physical Activity // 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR). Utrecht, Netherlands, 2020. P. 166–173.
5. Jerdan S. W., Grindle M., Woerden van H. C., Kamel Boulos M. N. Head-mounted virtual reality and mental health: Critical review of current research // Med. Internet Res. 2018. Vol. 3, № 6. P. 14–22.
6. Badia S. B., Quintero L. V., Cameirao M. S. [et al.]. Toward emotionally adaptive virtual reality for mental health applications // IEEE J. Biomed. Health Inform. 2019. Vol. 23, № 5. P. 1877–1887.
7. Тычков А. Ю., Алимуратов А. К., Чураков П. П. [и др.]. Влияние виртуальной реальности на психическое здоровье при проектировании автоматизированных систем управления // 4-я научная школа по динамике сложных сетей и их применению в интеллектуальной робототехнике (DCNAIR) (7–9 сентября 2020 г.). Иннополис, Россия. 2020. С. 248–250.
8. Тычков А. Ю., Алимуратов А. К., Агейкин А. В., Светлов А. В. Определение психогенных маркеров в речевых сигналах с использованием теории ННТ // Инженерия и телекоммуникации (ЕнТ-МФТИ) (15–16 ноября 2018 г.). М., 2018. С. 184–187. doi: 10.1109/ЕнТ-МФТИ.2018.00048
9. Бофанова Н. С., Буланов А. А., Яворский А. С., Алехина Е. В. Виртуальная реальность как современное направление в реабилитации пациентов с фантомной болью в конечностях // Российский журнал боли. 2021. Т. 19, № 2. С. 33–37.
10. Харитонов С. В. Основы когнитивно-поведенческой психотерапии: Руководство по когнитивно-поведенческой психотерапии. М.: Психотерапия, 2017.
11. Kometer H., Luedtke S., Stanuch K. [et al.]. The effects virtual reality has on physiological responses as compared to two-dimensional video // Adv. Stud. Sci. 2010. № 1. P. 1–21.
12. Павлов К. И., Мухин В. Н., Сырцев А. В. [и др.]. Метод variability сердечного ритма в исследовании когнитивных функций и профессиональной адаптации военнослужащих // Медицинский академический журнал. 2017. Т. 17, № 4. С. 7–17.
13. Wang T.-C., Sit C. H.-P., Tang T.-W., Tsai C.-L. Psychological and physiological responses in patients with generalized anxiety disorder: The use of acute exercise and virtual reality environment // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. Vol. 17, № 13. P. 4855.
14. Wen T. Y., Mohd Aris S. A. Electroencephalogram (EEG) stress analysis on alpha/beta ratio and theta/beta ratio // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2020. Vol. 17, № 1. P. 175–182.
15. Suhaimi N. S., Mountstephens J., Teo J. EEG-based emotion recognition: A state-of-the-art review of current trends and opportunities // Computational Intelligence and Neuroscience. 2020. doi: 10.1155/2020/8875426
16. Rashid M., Sulaiman N., Majeed A. P. P. [et al.]. Current status, challenges, and possible solutions of EEG-based brain-computer interface: A comprehensive review // Front. Neurobot. 2020. Vol. 14. doi: 10.3389/fnbot.2020.00025.eCollection 2020
17. Piradov M. A., Tanashyan M. M., Krotenkova M. V. [et al.]. State-of-the-art neuroimaging techniques // Clinical Neurology. 2015. Vol. 9, № 4. P. 11–18.

References

1. Korabel'nikova E.A. Anxiety disorders in the context of the COVID-19 pandemic. *Meditsinskiy vestnik Severnogo Kavkaza = Medical Bulletin of the North Caucasus*. 2021;(16):79–85. (In Russ.)
2. Skvortsov K.A. Virtual and augmented reality technologies: opportunities and obstacles of application. *Moya professional'naya kar'era = My professional career*. 2019;3(5):183–187. (In Russ.)
3. *Dorozhnaya karta razvitiya «skvoznoy» tsifrovoy tekhnologii «tekhnologii virtual'noy i dopolnennoy real'nosti» = Roadmap for the development of "end-to-end" digital technology "technologies of virtual and augmented reality"*. Moscow, 2019. (In Russ.). Available at: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019npt.pdf>
4. Straßmann C., Arntz A., Eimler S.C. Under The (Plastic) Sea-Sensitizing People Toward Ecological Behavior Using Virtual Reality Controlled by Users' Physical Activity. *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. Utrecht, Netherlands, 2020:166–173.
5. Jerdan S.W., Grindle M., Woerden van H. C., Kamel Boulos M. N. Head-mounted virtual reality and mental health: Critical review of current research. *Med. Internet Res.* 2018;3(6):14–22.

6. Badia S.B., Quintero L.V., Cameirao M.S. [et al.]. Toward emotionally adaptive virtual reality for mental health applications. *IEEE J. Biomed. Health Inform.* 2019;23(5):1877–1887.
7. Tychkov A.Yu., Alimuradov A.K., Churakov P.P. [et al.]. The influence of virtual reality on mental health in the design of automated control systems. *4-ya nauchnaya shkola po dinamike slozhnykh setey i ikh primeneniyu v intellektual'noy robototekhnike (DCNAIR) (7–9 sentyabrya 2020 g.) = 4th Scientific School on the dynamics of complex networks and their application in intelligent robotics (DCNAIR) (September 7–9, 2020)*. Innopolis, Rossiya. 2020:248–250. (In Russ.)
8. Tychkov A.Yu., Alimuradov A.K., Ageykin A.V., Svetlov A.V. Determination of psychogenic markers in speech signals using HHT theory. *Inzheneriya i telekommunikatsii (EnT-MFTI) (15–16 noyabrya 2018 g.) = Engineering and Telecommunications (EnT-MIPT) (November 15-16, 2018)*. Moscow, 2018:184–187. (In Russ.). doi: 10.1109/EnT-MFTI.2018.00048
9. Bofanova N.S., Bulanov A.A., Yavorskiy A.S., Alekhina E.V. Virtual reality as a modern direction in the rehabilitation of patients with phantom limb pain. *Rossiyskiy zhurnal boli = Russian Journal of Pain.* 2021;19(2):33–37. (In Russ.)
10. Kharitonov S.V. *Osnovy kognitivno-povedencheskoy psikhoterapii: Rukovodstvo po kognitivno-povedencheskoy psikhoterapii = Fundamentals of cognitive behavioral psychotherapy: A guide to cognitive behavioral psychotherapy*. Moscow: Psikhoterapiya, 2017. (In Russ.)
11. Kometer H., Luedtke S., Stanuch K. [et al.]. The effects virtual reality has on physiological responses as compared to two-dimensional video. *Adv. Stud. Sci.* 2010;(1):1–21.
12. Pavlov K.I., Mukhin V.N., Syrtsev A.V. [et al.]. Method of heart rate variability in the study of cognitive functions and professional adaptation of military personnel. *Meditsinskiy akademicheskiy zhurnal = Medical Academic Journal.* 2017;17(4):7–17. (In Russ.)
13. Wang T.-C., Sit C. H.-P., Tang T.-W., Tsai C.-L. Psychological and physiological responses in patients with generalized anxiety disorder: The use of acute exercise and virtual reality environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020;17(13):4855.
14. Wen T.Y., Mohd Aris S.A. Electroencephalogram (EEG) stress analysis on alpha/beta ratio and theta/beta ratio. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science.* 2020;17(1):175–182.
15. Suhaimi N.S., Mountstephens J., Teo J. EEG-based emotion recognition: A state-of-the-art review of current trends and opportunities. *Computational Intelligence and Neuroscience.* 2020. doi: 10.1155/2020/8875426
16. Rashid M., Sulaiman N., Majeed A.P.P. [et al.]. Current status, challenges, and possible solutions of EEG-based brain-computer interface: A comprehensive review. *Front. Neurobot.* 2020;14. doi: 10.3389/fnbot.2020.00025.eCollection 2020
17. Piradov M.A., Tanashyan M.M., Krotenkova M.V. [et al.]. State-of-the-art neuroimaging techniques. *Clinical Neurology.* 2015;9(4):11–18.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Юрьевич Тычков

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

Alexander Yu. Tychkov

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

Денис Сергеевич Чернышов

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

Denis S. Chernyshov

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

Наталья Сергеевна Бофанова

кандидат медицинских наук,
доцент кафедры неврологии,
нейрохирургии и психиатрии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: box5887@mail.ru

Natalia S. Bofanova

Candidate of medical sciences,
associate professor of the sub-department
of neurology, neurosurgery and psychiatry,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алан Казанферович Алимуратов

кандидат технических наук,
директор бизнес-инкубатора
Научно-исследовательский институт
фундаментальных и прикладных исследований,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alansapfir@yandex.ru

Дмитрий Леонидович Овчинников

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

Александр Михайлович Сотников

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sanchess2015@yandex.ru

Alan K. Alimuradov

Candidate of technical sciences,
director of the business incubator
of research institute for fundamental
and applied research,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Dmitry L. Ovchinnikov

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

Alexander M. Sotnikov

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

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

Поступила в редакцию/Received 16.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.08.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021