

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Чувыкин Б. В., Долгова И. А., Миловзоров Г. В.

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ
ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ
С ОГРАНИЧЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

5

Агаев Ф. Г., Асадов Х. Г., Омаров М. Э., Алиева С. С.

МОНИТОРИНГ ФЕНОЛОГИИ РАЗВИТИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ
ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУЦИРОВАННОГО
ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА

13

Скрябин Ю. М.

ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

20

Верхушин С. С., Мищенко В. И., Мищенко И. В., Исаков К. Н.

ВЫБОР ПРОТОТИПА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЕЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ
ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ

30

Михайлов Е. А., Мищенко В. И., Пермиков А. П.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ
СРОКА СЛУЖБЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

40

Михайлов П. Г., Михайлов А. П., Пасхин И. Н., Ахметов А. Р., Фадеев Е. Д.

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ
СТРУКТУР МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ ДАТЧИКОВ
ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

46

Урваев И. Н., Базыкин С. Н.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПОДВОДНОГО БЕЗЭКИПАЖНОГО АППАРАТА

58

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Алиева А. Дж., Алиева Х. С., Ашрафов М. Г., Мустафазаде Н. Х.
ОПТИМИЗАЦИЯ АЛЬБЕДОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

68

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Волков В. С., Базыкин С. Н., Бардин В. А., Самохина К. С., Волкова Н. В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА
ДАВЛЕНИЯ В ВИДЕ ГОФРИРОВАННОЙ КРЕМНИЕВОЙ МЕМБРАНЫ

76

Светлов А. В., Колдов А. С.
ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ
ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

84

Цытин Б. В., Прокопчук С. П.
ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ПРОВЕРКЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

92

Лозунов С. В., Благодыренко Е. В., Герасименко И. С., Куприянов Н. А.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОМБИНИРОВАНИЯ
НЕРАВНОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ
ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ СПУТНИКОВ

103

Печерская Е. А., Чихрина У. С., Карпанин О. В., Голубков П. Е., Гурин С. А.
ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ ТИТАНАТА БАРИЯ,
ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

116

*Печерская Е. А., Карпанин О. В., Нелюцкова Д. Е.,
Метальников А. М., Чихрина У. С.*
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ
РАЗРАБОТАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

123

Ефремов А. С., Лукичев А. В.
КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ВЕДОМСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОВЕРОЧНЫХ ОРГАНОВ

129

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Спринджук М. В., Берник В. И., Кончиц А. П.
СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА БИОИНФОРМАЦИОННЫХ
ДАННЫХ ГЕНОМНОЙ ПРИРОДЫ И НОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ
ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

139

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Chuvykin B.V., Dolgova I.A., Milovzorov G.V.

PULSE SIGNAL AMPLITUDE RECOVERY METHODS
IN CHANNELS WITH LIMITED DYNAMIC RANGE

5

Agayev F.G., Asadov H.H., Omarov M.E., Aliyeva S.S.

MONITORING THE PHENOLOGY OF VEGETATION DEVELOPMENT
BY MEASURING INDUCED FLUORESCENT EMISSION OF CHLOROPHYLL

13

Scryabin Yu.M.

THE INFLUENCE OF NOISE ON THE ACCURACY
OF DETERMINING THE LOCATION OF AN AIRCRAFT
BY AN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM
OF ELECTROSTATIC LOCATION

20

Verkhushin S.S., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V., Isakov K.N.

SELECTION OF A PROTOTYPE MODEL OF THE PROCESS
OF FUNCTIONING OF THE MEASURING CHANNEL
OF A MULTICHANNEL MEASURING SYSTEM
FOR CALCULATING ITS AVAILABILITY COEFFICIENT
WITH LIMITED INFORMATION ABOUT RELIABILITY

30

Mikhaylov E.A., Mishchenko V.I., Permyakov A.P.

ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO SUBSTANTIATING
THE SERVICE LIFE OF METROLOGICAL COMPLEXES

40

Mikhaylov P.G., Mikhaylov A.P., Pashkin I.N., Akhmetov A.R., Fadeev E.D.

METHODS FOR ENSURING THE STABILITY
OF FILM STRUCTURES OF METAL-FILM SENSORS
FOR ROCKET, SPACE AND AVIATION EQUIPMENT

46

Urvayev I.N., Bazykin S.N.

COMPUTER SIMULATION OF HYDRODYNAMICS
OF AN UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

58

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Alieva A.J., Alieva Kh.S., Ashrafov M.G., Mustafazade N.Kh.

OPTIMIZATION OF ALBEDOMETRIC MEASUREMENTS
USING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

68

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Volkov V.S., Bazykin S.N., Bardin V.A., Samohina K.S., Volkova N.V.

SIMULATION OF A PRESSURE SENSOR SENSING ELEMENT
BASED ON A CORRUGATED SILICON MEMBRANE

76

Svetlov A.V., Koldov A.S.

INVESTIGATION OF AN AMPLITUDE DETECTOR
FOR RESONANT ELECTRICAL CIRCUIT PARAMETER METERS

84

Tsylin B.V., Prokopchuk S.P.

ASSESSMENT OF MEASUREMENT RESULTS DURING
TECHNOLOGICAL CHECKING OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

92

Logunov S.V., Blagodyrenko E.V., Gerasimenko I.S., Kupriyanov N.A.

DETERMINATION THRESHOLD ERRORS FOR THE APPLICATION
OF THE METHOD OF COMBINING NON-PRECISION MOTION
PARAMETERS MEASUREMENTS MANEUVERING SATELLITES

103

Pecherskaya E.A., Chikhrina U.S., Karpanin O.V., Golubkov P.E., Gurin S.A.

INVESTIGATION OF THE SURFACE MORPHOLOGY
OF A FERROELECTRIC BARIUM TITANATE FILM
OBTAINED BY MICROARC OXIDATION

116

Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Nelyutskova D.E.,

Metelnikov A.M., Chikhrina U.S.

INVESTIGATION OF THE VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS
OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES USING THE DEVELOPED
AUTOMATED INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM

123

Efremov A.S., Lukichev L.V.

A SET OF MODELS FOR THE CONSTRUCTION AND FUNCTIONING
OF THE DEPARTMENTAL SYSTEM OF VERIFICATION BODIES

129

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Sprindzuk M.V., Bernik V.I., Konchits A.P.

MODERN CLASSIFICATION OF SOFTWARE FOR THE ANALYSIS
OF BIOINFORMATION DATA OF GENOMIC NATURE
AND NOVEL CONCEPTS FOR THE INTERPRETATION
OF COMPUTATIONAL EXPERIMENTS

139

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 621.391

doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-1

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ С ОГРАНИЧЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

Б. В. Чувькин¹, И. А. Долгова², Г. В. Миловzorov³

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

³ Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

¹ chuvukin_bv@mail.ru, ² dolgovair@mail.ru, ³ gvmilovzorov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность тематики определяется все более широким применением в информационно-измерительных системах датчиков преобразующей аппаратуры специального назначения. В работе поднимается проблема восстановления импульсных информационных сигналов с искаженной из-за ограничения динамического диапазона амплитудой. *Материалы и методы.* Для решения проблемы были использованы методы математического аппарата теории целых функций экспоненциального типа, теории вейвлетов или математических моделей во временной области. При применении этих методов восстановление искаженной амплитуды импульсных информационных сигналов в зависимости от частотно-временных свойств сигналов выполняется на этапе цифровой обработки измерительного сигнала путем решения систем линейных уравнений. *Результаты.* Рассмотрены необходимые и достаточные условия для восстановления экстремальных значений амплитуд импульсных сигналов с использованием измерительной информации неискаженной части сигнала и априорной информации о его частотно-временных свойствах. Приведены примеры алгоритмов восстановления для трех классов измерительных импульсных сигналов. *Выводы.* Анализ результатов проведенных исследований позволяет считать перспективным использование рассмотренных методов в информационно-измерительных системах для решения задач снижения амплитудных искажений, вызванных ограниченным динамическим диапазоном.

Ключевые слова: импульсные сигналы, амплитудные искажения, динамический диапазон, финитные функции, вейвлеты, интерполяционные функции

Для цитирования: Чувькин Б. В., Долгова И. А., Миловzorov Г. В. Методы восстановления амплитуды импульсных сигналов в каналах с ограниченным динамическим диапазоном // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 5–12. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-1

PULSE SIGNAL AMPLITUDE RECOVERY METHODS IN CHANNELS WITH LIMITED DYNAMIC RANGE

B.V. Chuvykin¹, I.A. Dolgova², G.V. Milovzorov³

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

³ Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, Izhevsk, Russia

¹ chuvukin_bv@mail.ru, ² dolgovair@mail.ru, ³ gvmilovzorov@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is determined by the increasing use of special-purpose sensor-converting equipment in information and measuring systems. The paper raises the problem of restoring pulsed information signals with amplitude distorted due to the limitation of the dynamic range. *Materials and methods.* To solve the problem, the methods of the mathematical apparatus of the theory of integer functions of exponential type, the theory of wavelets or mathematical models in the time domain were used. When applying these methods, the restoration of the distorted amplitude of pulsed information signals depending on the frequency-time properties of the signals is carried out at the stage of digital processing of the measuring signal by solving systems of linear equations. *Results.* Necessary and sufficient conditions for recovery of extreme values of amplitudes of pulse signals are considered, using measuring information of undistorted part of signal and a priori information on its frequency-time properties. Examples of recovery algorithms for three classes of measuring pulse signals are given. *Conclusions.* Analysis of the results of the conducted studies allows us to consider the use of the considered methods in information and measuring systems for solving problems of reducing amplitude distortions caused by a limited dynamic dipason.

Keywords: pulse signals, amplitude distortion, dynamic range, finite functions, wavelets, interpolation functions

For citation: Chuvykin B.V., Dolgova I.A., Milovzorov G.V. Pulse signal amplitude recovery methods in channels with limited dynamic range. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):5–12. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-1

Введение

При измерении «тонкой структуры» сигналов малого уровня могут возникнуть искажения импульсных сигналов высокого уровня из-за ограничения динамического диапазона измерительного канала. Информация об экстремальном значении амплитуды импульса и моменте его наступления является важнейшей информативной составляющей импульсного сигнала. Задача расчета значения амплитуды импульса и момента его наступления может быть решена различными методами в зависимости от конкретных условий.

Цель данной статьи – рассмотрение общих методов восстановления амплитуды импульсных сигналов в каналах с ограниченным динамическим диапазоном.

Постановка задачи

Исследовать необходимые и достаточные условия восстановления экстремальных значений амплитуд импульсных сигналов с использованием измерительной информации неискаженной части сигнала и априорной информации об его частотно-временных свойствах.

Теория

В качестве исходных математических моделей можно использовать три общих метода описания импульсных сигналов:

1. Описание импульсных сигналов в частотной области. Предполагается, что математической моделью импульсных сигналов могут служить сигналы с финитным спектром. Условие финитности спектра в ряде случаев является допустимой идеализацией. В качестве примера можно указать функцию Котельникова, которая является частным случаем в теории целых функций экспоненциального типа (ЦФЭТ) [1]. Из теории ЦФЭТ известно, что сигналы с финитным спектром допускают однозначное представление во временной области своими нулями. Из этого следует, что при выполнении определенных условий сигнал может быть восстановлен без искажений с использованием математической процедуры факторизации. Поскольку ограничение амплитуды не приводит к потере информации о нулевых значениях сигнала, процедура факторизации может служить математической основой для разработки практических интерполяционных алгоритмов восстановления сигналов, ограниченных по амплитуде [2].

2. Сигналы, хорошо локализованные в частотно-временной области. В качестве примера этого класса сигналов можно указать сигнал «Мексиканская шляпа» (вторая производная от функции Гаусса). Для описания этого класса сигналов используется математическая теория вэйвлетов [3]. Вэйвлеты нашли широкое практическое применение в измерительной технике [4]. Существует достаточное количество базовых вейвлет-функций и алгоритмов их синтеза с заданными частотно-временными свойствами. Благодаря этому для данного класса сигналов алгоритм восстановления можно построить путем последовательного подбора наилучшей вэйвлет-интерполяционной функции.

3. Описание сигналов во временной области. Такой подход имеет место при наличии априорной информации в виде математической модели импульсных сигналов, полученной на основе статистических данных, например, таких как кардиосигналы в медицине, либо с использованием известного механизма сигналообразования [5].

Рассмотрим некоторые прикладные вопросы построения интерполяционных функций, которые возникают при использовании этих математических моделей.

Результаты экспериментов

Для варианта описания импульсных сигналов в частотной области в качестве алгоритма факторизации можно воспользоваться представлением импульсного сигнала $g(t)$ с финитным спектром своими действительными нулями [2]:

$$g(t) = \frac{\sin(\pi t)^m}{(\pi t)^q} \cdot \frac{\prod_{j=1}^L \left(1 - \left(\frac{t}{d_j}\right)^2\right)}{\prod_{k=1}^M \left(1 - \left(\frac{t}{s_k}\right)^2\right)} \cdot \prod_{p=1}^K (\cos(\pi t) - \cos(\pi t_p)), \quad (1)$$

где m – кратность нуля базовой функции в особой точке $t = 0$; q – количество исключенных нулей в начале координат $q = 0, 1, \dots, m$; K – количество нулей базовой функции на интервале периодичности; M – количество исключенных симметричных пар нулей; L – количество введенных симметричных пар нулей; $t_1, t_2, \dots, t_p, \dots, t_K$ – двойные нули базовой функции на интервале периодичности $[-1, 1]$.

В формуле (1) допущены некоторые упрощения, которые являются необходимыми для ее корректного использования. Целые функции экспоненциального типа определены на всем бесконечном интервале времени, в то время как импульсный сигнал ограничен во времени на некотором интервале. По этой причине нули базовой функции $[t_1, t_2, \dots, t_p, \dots, t_K]$ на интервале $[-1, 1]$ должны быть продолжены в виде периодической последовательности на весь интервал времени. Для аппроксимации неперiodических нулей предусмотрены процедуры исключения нулей (s_k) и введение новых нулей (d_j).

Очевидно, что импульсные сигналы с финитным спектром, которые могут быть представлены формулой (1), допускают однозначное представление своими нулями и могут быть полностью восстановлены с точностью до масштаба через процедуру факторизации при любом уровне ограничения их амплитуд.

При практической реализации интерполяции по вещественным нулям возникает проблема нахождения комплексно-сопряженных пар нулей, которые в отличие от вещественных нулей не могут быть определены непосредственно из условия $g(t) = 0$ и не приведены в формуле (1).

Трудность заключается в том, что простых методов нахождения комплексных нулей не найдено. Так, наличие комплексно-сопряженных пар нулей в точке экстремума приводит к тому, что форма импульса меняется вплоть до перехода к многоэкстремальной форме импульса.

Учесть влияние комплексно-сопряженных пар нулей можно путем введения в формулу (1) дополнительного сомножителя с комплексно-сопряженными парами нулей $\pm iz_1, \pm iz_2, \dots, \pm iz_E$:

$$g^*(t) = g(t) \prod_{i=1}^E (\sin(\pi t)^2 + z_i^2). \quad (2)$$

Из этого следует, что при использовании обобщенной формулы (2) необходимо рассмотреть несколько вариантов ($m = 1; E = 0$), ($m = 2; E = 0$), ($m = 1; E = 1$) и т.д. При этом критерием выбора наилучшего варианта интерполяционной формулы служит вариант, при котором имеет место минимальная погрешность интерполяции на неискаженных участках сигнала.

Рассмотрим пример восстановления амплитуды импульсного сигнала с финитным спектром и комплексно-сопряженной парой нулей в точке экстремума, что проявляется как «раздвоение» вершины импульса (рис. 1).

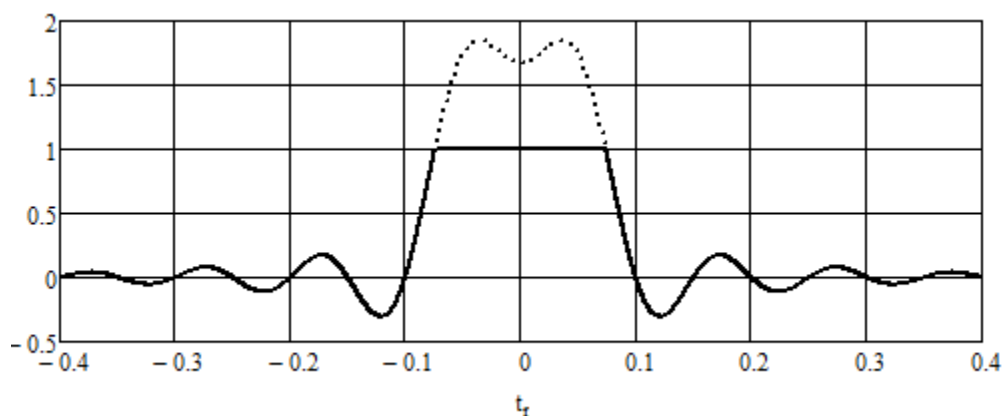


Рис. 1. Импульсный сигнал $x(t)$ без ограничения (пунктирная линия) и с ограничением по амплитуде (сплошная линия)

В качестве исходных условий служат значения координат нулей $t_1; t_2; \dots; t_D$, моменты времени T_1, T_2 начала и окончания ограничения сигнала, и амплитуда ограничения Um . Интерполяционная формула $Mc \cdot Ir(t)$, построенная из этих условий, приведена ниже:

$$Ir(t) = Mc \cdot (\sin(\pi t)^2 + z^2)^* \cdot \left(\frac{\sin(\pi t)}{\pi t} \right)^\beta \cdot \prod_{p=1}^D (\cos(\pi t) - \cos(\pi p t_p)). \quad (3)$$

В формуле (3) сомножитель, отмеченный (*), исключается для варианта отсутствия комплексных нулей. Масштабный коэффициент Mc находится из условия $Ir(T_1) + Ir(T_2) = 2Um$.

Ниже (на рис. 2) приведены графики восстановленного сигнала $Ir(t)$ по формуле (3) и исходного сигнала $x(t)$. Для расчета использовались только первые пять пар нулей ($D = 5$) и $\beta = 1$. Предполагалось, что координаты остальных нулей остались неизвестны из-за наличия помех, поэтому для корректного использования формулы (2) были введены дополнительные нули. Координаты нулей выбирались так, чтобы на всем интервале времени их плотность оставалась постоянной. Общее количество нулей, согласно формуле (1), равно $K = 20$.

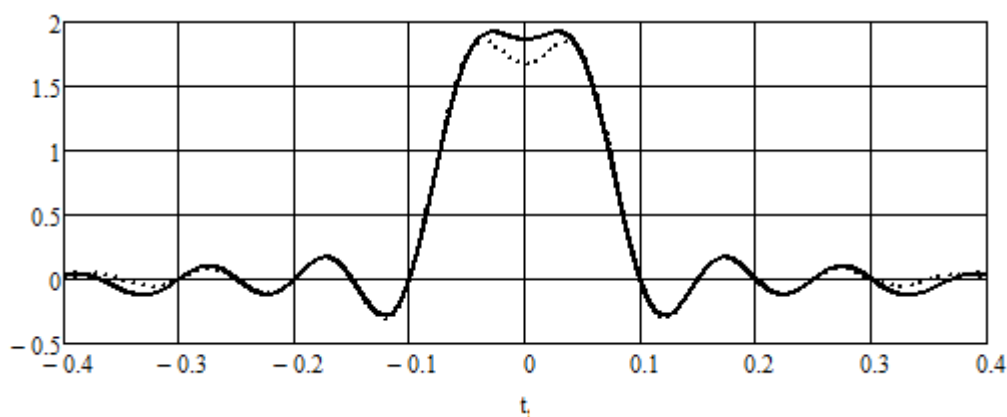


Рис. 2. График восстановленного сигнала $Ir(t)$ (сплошная линия) и график исходного сигнала $x(t)$ (пунктирная линия)

Отметим, что использование классических формул полиномиальной интерполяции не дает возможность даже качественного восстановления импульсного сигнала (обнаружения двух экстремумов). Наличие априорной информации о частотных свойствах импульсного сигнала позволяет решить задачу не только на качественном уровне (наличие двух экстремумов), но и на количественном уровне найти приближенные значения амплитуд экстремальных точек.

Для варианта описания сигналов, хорошо локализованных в частотно-временной области, рассмотрим пример использования вейвлет-интерполяционной функции на основе сплайнов. Отметим, что сплайны – это полиномиальные функции с максимальной гладкостью, которые не имеют разрывов производных высоких порядков до уровня $k - 1$, где k – это порядок

полинома [3]. Вэйвлет-интерполяционные функции удобно представлять, используя их операторную запись в виде обобщенной аналого-цифровой передаточной функции $H(p, z)$ [5]:

$$H(p, z) = H(p)H(z) = \left[\left(\frac{1 - e^{-p}}{p} \right)^k \cdot (1 - e^{-p})^{2m} \right] \cdot \left[z^{-N} \cdot \sum_{j=1}^N a_j (z^j + z^{-j}) \right], \quad (5)$$

где p – оператор дифференцирования Лапласа для непрерывной (аналоговой) формы представления сигнала; z – оператор сдвига на шаг дискретизации для цифровой (дискретной) формы представления сигнала; передаточная функция $H(p)$ – это операторное представление $2m$ -кратного дифференцирования сплайна k -го порядка; $H(z)$ – передаточная функция цифрового фильтра N -го порядка; a_j – коэффициенты алгоритма разложения сигнала по гармоникам сплайн-вэйвлет функции [4].

Во временной области сплайн-вэйвлет функция $g(t)$ в явном виде находится после подстановки $p = i\omega$ $z = e^{i\omega}$ в формулу (5), через обратное преобразование Фурье $F\{\cdot\}$: $g(t) = F\{H(i\omega) H(e^{i\omega})\}$. Ниже (на рис. 3) приведены примеры сплайн-вэйвлет функций для различных значений порядка k и кратности дифференцирования $2m$.

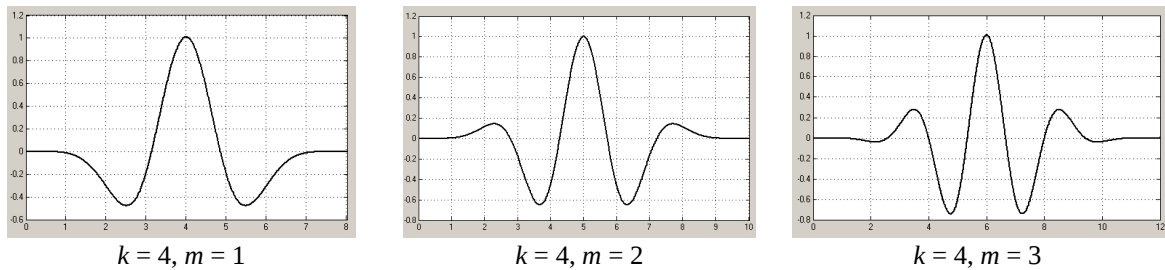


Рис. 3. Сплайн-вэйвлет функции для $k = 4$ и кратности дифференцирования: $m = 1$, $m = 2$ и $m = 3$

Выбор кратности дифференцирования m при построении вэйвлет-интерполяционной функции, как это видно из рис. 3, будет зависеть от числа затухающих колебаний в информативном импульсном сигнале. При увеличении порядка k до значений 5–6, сплайн приближается по форме к функции Гаусса, что дает возможность с достаточной точностью восстанавливать импульсные колебательные сигналы, амплитуда которых убывает по экспоненциальному закону.

На рис. 4 приведен пример восстановления импульсного колебательного сигнала вэйвлет-интерполяционной функцией с ограниченной гладкостью ($k = 4$, $m = 2$).

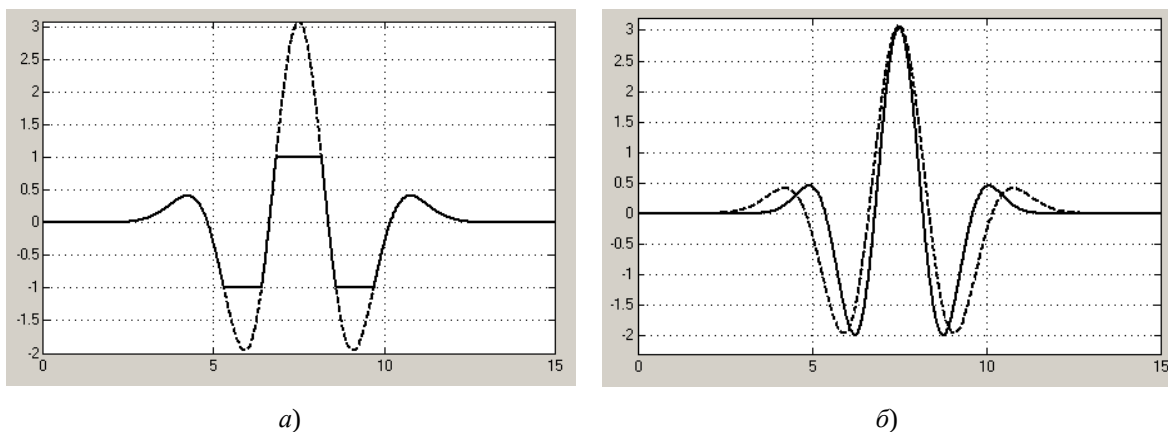


Рис. 4. Графики: а – импульсного сигнала, ограниченного по амплитуде (сплошная линия); б – восстановленного сигнала (неискаженный сигнал – пунктирная линия)

Отметим, что использование вейвлет-интерполяционных функций на основе сплайнов, преимущество которых в простоте реализации, имеет и существенный недостаток, поскольку необходимым условием его корректного применения является условие центральной симметрии импульсного сигнала, что на практике выполняется далеко не всегда.

Для восстановления несимметричных импульсных сигналов очевидным решением является использование несимметричных по форме взрывов, например взрывы И. Добиши [3]. Однако этому вопросу в литературе уделено мало внимания, что связано со сложностью алгоритмов математического описания данного класса сигналов.

Описание сигналов во временной области рассмотрим на примерах восстановления сейсмических импульсов. Модели сейсмических импульсов в сейсморазведке, которые используются для приближенного описания реальных сейсмограмм, приведены ниже в табл. 1 [6].

Таблица 1

Математические модели сейсмических импульсов

Название	Математическая модель	Нормированные временные формы
1. Берлаге	$g(t) = t^k \cdot \exp(-bt) \cdot \sin(\omega t + \phi)$	$\omega = 2\pi, k = 6, b = 5$
2. Гельфанда	$g(t) = \exp(-bt^2) \cdot \sin(\omega t)$	$\omega = 2\pi, b = 3$
3. Риккера	$g(t) = (1 - 2(\omega t / 2)^2) \cdot \exp(-(\omega t / 2)^2)$	$\omega = 2\pi, b = 3$
4. Пузырева	$g(t) = (\exp(-\omega t / \pi))^2 \cdot \sin(\omega t / \pi + \phi)$	$\omega = 2\pi$
Значение фазы ϕ находится из условия: $\int g(t, \phi) dt = 0$		

Рассмотрим алгоритм восстановления импульсного информационного сигнала $x(t)$ с искаженной из-за ограничения динамического диапазона амплитудой на примере импульса Берлаге (рис. 5).

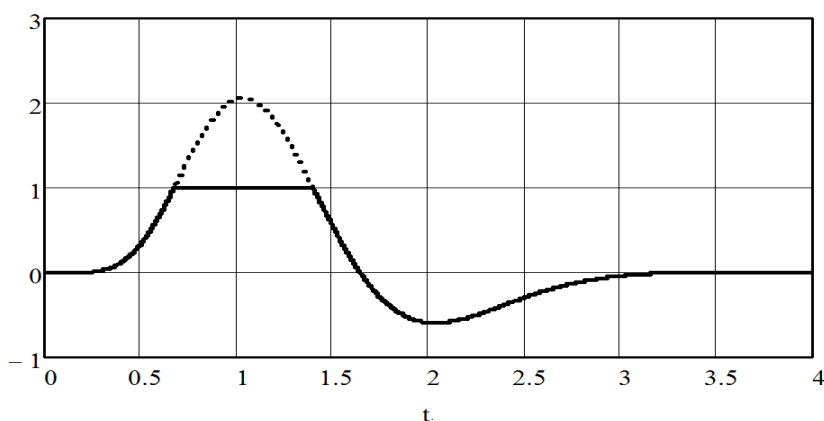


Рис. 5. Графики импульса Берлаге, искаженного из-за ограничения динамического диапазона (сплошная линия), исходный сигнал – пунктирная линия

Исходя из формулы (табл. 1 п.1), неизвестными величинами для построения интерполяционной функции являются k, b, ω , а также моменты времени начала $T1$ и окончания $T2$ ограничения сигнала. Начальное значение k выбирается из колонки таблицы «Нормированные временные формы». Его значение уточняется по критерию наилучшей интерполяции переднего фронта сигнала до момента $T1$. Значения коэффициентов b и ω нормированы и соответствуют частоте колебаний 1 Гц. Их оптимальные значения подбираются с помощью итерационного алгоритма расчета коэффициента подобия $R(b, \omega)$, реализующего процедуру нормированной свертки:

$$R(b, \omega) = \frac{\int_{T2}^{\infty} g(t, b, \omega) \cdot x(t) dt}{\sqrt{\int_{T2}^{\infty} g(t, b, \omega)^2 dt} \cdot \sqrt{\int_{T2}^{\infty} x(t)^2 dt}}. \quad (6)$$

Критерием оптимального результата является условие, при котором значение коэффициента подобия $R(b, \omega)$ достигает локального максимума. Предельное значение $R(b, \omega)$ равно единице при выполнении условия полного совпадения формы синтезированного сигнала $g(t)$ с формой исходного информационного сигнала $x(t)$.

Заключение

В статье приведены примеры алгоритмов восстановления для следующих трех классов измерительных импульсных сигналов:

- 1) для импульсных сигналов в частотной области предлагается в качестве математической модели использовать математическую процедуру факторизации;
- 2) для сигналов, хорошо локализованных в частотно-временной области, предлагается в качестве математической модели использовать вейвлет-интерполяционные функции;
- 3) для сигналов во временной области предлагается в качестве математической модели использовать модели импульсных сигналов, полученные на основе статистических данных, или модели, построенные с применением известного механизма сигналообразования.

Анализ результатов подтверждает перспективность использования рассмотренных методов в информационно-измерительных системах для решения задач снижения амплитудных искажений, вызванных ограниченным динамическим диапазоном измерительных каналов.

Список литературы

1. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Фinitные функции в физике и технике. М. : Наука, 1971. 408 с.
2. Чувькин Б. В. Фinitные функции. Теория и инженерные приложения. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1999. 100 с.
3. Чуи Ч. Введение в вейвлеты : пер. с англ. М. : Мир, 2001. 412 с.
4. Истомина Т. В., Чувькин Б. В., Щеголев В. Е. Применение теории wavelets в задачах обработки информации. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 160 с.
5. Чувькин Б. В., Долгова И. А. Метод синтеза аналого-цифровых фильтров замкнутого вида с линейной фазой и фinitной импульсной весовой функцией для многоканальных информационно-измерительных систем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 32–39.
6. Рабинович Е. В., Ганчин К. С., Пупышев И. М., Шефель Г. С. Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта // Математические структуры и моделирование. 2014. № 4. С. 105–111.

References

1. Khurgin Ya.I., Yakovlev V.P. *Finitnye funktsii v fizike i tekhnike* = *Finite functions in physics and technology*. Moscow: Nauka, 1971:408. (In Russ.)
2. Chuvykin B.V. *Finitnye funktsii. Teoriya i inzhenernye prilozheniya* = *Theory and engineering applications*. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 1999:100. (In Russ.)
3. Chui Ch. *Vvedenie v veyvlety: per. s angl.* = *Introduction to wavelets: translated from English*. Moscow: Mir, 2001:412. (In Russ.)
4. Istomina T.V., Chuvykin B.V., Shchegolev V.E. *Primenenie teorii wavelets v zadachakh obrabotki informatsii* = *Application of the theory of wavelets in information processing problems*. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2000:160. (In Russ.)
5. Chuvykin B.V., Dolgova I.A. A method for synthesizing analog-to-digital closed-loop filters with a linear phase and a finite pulse weighting function for multichannel information and measurement systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2024;(2): 32–39. (In Russ.)
6. Rabinovich E.V., Ganchin K.S., Pupyshev I.M., Shefel' G.S. Model of the seismic pulse arising during hydraulic fracturing. *Matematicheskie struktury i modelirovanie* = *Mathematical structures and modeling*. 2014;(4):105–111. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Викторович Чувькин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chuvukin_bv@mail.ru

Boris V. Chuvykin

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

Ирина Анатольевна Долгова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационно-
вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dolgovair@mail.ru

Irina A. Dolgova

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

Георгий Владимирович Миловzorov

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры тепловых двигателей
и установок,
Ижевский государственный технический
университет имени М. Т. Калашникова
(Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)
E-mail: gvmilovzorov@mail.ru

Georgy V. Milovzorov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of heat engines and installations,
Izhevsk State Technical University
named after M.T. Kalashnikov
(7 Studentskaya street, Izhevsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 13.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 08.07.2024

Принята к публикации / Accepted 05.08.2024

МОНИТОРИНГ ФЕНОЛОГИИ РАЗВИТИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУЦИРОВАННОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА

Ф. Г. Агаев¹, Х. Г. Асадов², М. Э. Омаров³, С. С. Алиева⁴

^{1, 2, 3, 4} Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджанская Республика
¹ director.tekti@mail.ru, ² asadzade@rambler.ru, ³ meracomarov@gmail.com, ⁴ sevdaaliyeva06.01@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Точное определение фенологического цикла развития растительности важно для повышения эффективности сельскохозяйственных хозяйств. Рассматриваются вопросы осуществления мониторинга фенологии развития растительности в оптимальном режиме. Целью является оптимизация исследования фенологии растительности методом измерений индуцированного флуоресцентного излучения хлорофилла. Объектом исследования является фенология развития растительности. Предметом исследования является метод исследования фенологии растительности, заключающийся в проведении измерений индуцированного флуоресцентного излучения хлорофилла взамен индекса листовой площади LAI (Leaf Area Index). *Материалы и методы.* При модельном исследовании среднеинтегральной величины флуоресцентного излучения кроны солнечное излучение заменено на лазерное, что позволяет избежать отрицательного влияния атмосферных факторов. Для реализации поставленной цели был использован вариационный метод оптимизации. *Результаты.* Проведенная оптимизация позволила определить наихудший вариант модельной зависимости $L = L(\varphi)$, где L – расстояние между лидаром и деревом; φ – квантовый выход флуоресцентного сигнала, который приводит к наименьшей величине измеренного среднеинтегрального значения сигнала флуоресценции. *Выводы.* Рекомендовано не применять данный режим измерений в практике мониторинга фенологии растений с использованием результатов измерения флуоресцентного сигнала излучения хлорофилла.

Ключевые слова: мониторинг, флуоресценция, растительность, измерения, хлорофилл

Для цитирования: Агаев Ф. Г., Асадов Х. Г., Омаров М. Э., Алиева С. С. Мониторинг фенологии развития растительности путем измерения индуцированного флуоресцентного излучения хлорофилла // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 13–19. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-2

MONITORING THE PHENOLOGY OF VEGETATION DEVELOPMENT BY MEASURING INDUCED FLUORESCENT EMISSION OF CHLOROPHYLL

F.G. Agayev¹, H.H. Asadov², M.E. Omarov³, S.S. Aliyeva⁴

^{1, 2, 3, 4} National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan
¹ director.tekti@mail.ru, ² asadzade@rambler.ru, ³ meracomarov@gmail.com, ⁴ sevdaaliyeva06.01@gmail.com

Abstract. *Background.* Accurate determination of phenological cycle of vegetational growth is essential for increase of effectiveness of agriculture. The issues of monitoring the phenology of vegetation development in an optimal mode are considered. The goal is to optimize the research of vegetation phenology by measuring the induced fluorescence radiation of chlorophyll. The object of the study is the phenology of vegetation development. The subject of the study is the research method for investigating the phenology of vegetation, which consists in measuring the induced fluorescent radiation of chlorophyll instead of the LAI (Leaf Area Index). *Materials and methods.* In the model study of the average integral value of the fluorescent radiation of the crown, solar radiation was replaced by laser radiation, which avoids the negative influence of atmospheric factors. The variational method was used to reach the formulated goal. *Results.* The optimization made it possible to determine the worst-case model dependence $L = L(\varphi)$, where L is the distance between the lidar and the tree; φ is the quantum yield of the fluorescent signal, which leads to the smallest value of the measured average integral value of the fluorescence signal. *Conclusion.* It is recommended not to use such a measurement mode in the practice of monitoring plant phenology using the results of measuring the fluorescent signal of chlorophyll radiation.

Keywords: monitoring, fluorescence, vegetation, measurements, chlorophyll

For citation: Agayev F.G., Asadov H.H., Omarov M.E., Aliyeva S.S. Monitoring the phenology of vegetation development by measuring induced fluorescent emission of chlorophyll. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):13–19. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-2

Введение

Как отмечается в работе [1], общая первичная продукция GPP (Gross Primary Product) всякой растительности в виде биомассы появляется в результате фотосинтеза в масштабе кроны растения. Однако непосредственная точная оценка GPP в масштабах ландшафта или региона является пока нерешенной задачей. Теория Монтиза предлагает определить GPP как функцию поглощенной световой энергии APAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation), умноженную на показатель эффективности использования света (ϵ). Этот показатель характеризует превращение световой энергии в химическую энергию биомассы растительности, т.е. имеем

$$GPP = APAR\epsilon. \quad (1)$$

Однако определение ϵ является трудной задачей, так как этот показатель зависит от физиологических факторов и условий окружающей среды [2, 3]. Следовательно, поиск и разработку новых показателей и моделей, позволяющих осуществить точную оценку GPP, можно считать актуальной задачей. В работах [4–7] была обнаружена высокая степень корреляции между флуоресцентным излучением хлорофилла и фотосинтезом, а также GPP. Подобная корреляционная связь была подтверждена также для масштабных зон и регионов данными, полученными от космических средств дистанционного зондирования (спутники COSAT, GOME-2).

В ряде работ [3, 4] отмечено наличие линейной корреляционной связи между солнечной индуцированной флуоресценцией SIF (Solar Induced Fluorescence), однако в работе [8] утверждается нелинейный характер такой связи.

Для решения данного вопроса, естественно, в первую очередь следует определить метод точного измерения флуоресцентного излучения. Как отмечается в работе [9], было исследовано отношение переменной части флуоресцентного излучения (F_v) к максимальной величине этого излучения (F_m) в зависимости от дня года *DOY* (Day of Year) с помощью следующей функции:

$$\frac{F_v}{F_m} = \frac{\left[a(DOY - d)^2 \right]}{\left[b + (DOY - d)^2 \right]} + c, \quad (2)$$

где $\frac{F_v}{F_m}$ – амплитуда изменения; b – показатель сезонных «ям» $\frac{F_v}{F_m}$; d – величина *DOY*, в которой был зарегистрирован минимум $\frac{F_v}{F_m}$.

Однако такой показатель, как выражение (2), согласно работе [9] имеет максимум летом, осенью и зимой, т.е. не связан с показателями фенологии развития растительности. Хорошо известно, что фенологическое развитие растительности хорошо характеризуется такими показателями, как индекс листовой поверхности и количество хлорофилла в листьях. На рис. 1 показаны, соответственно, зависимость SIF от количества хлорофилла в листьях и значения LAI [1].

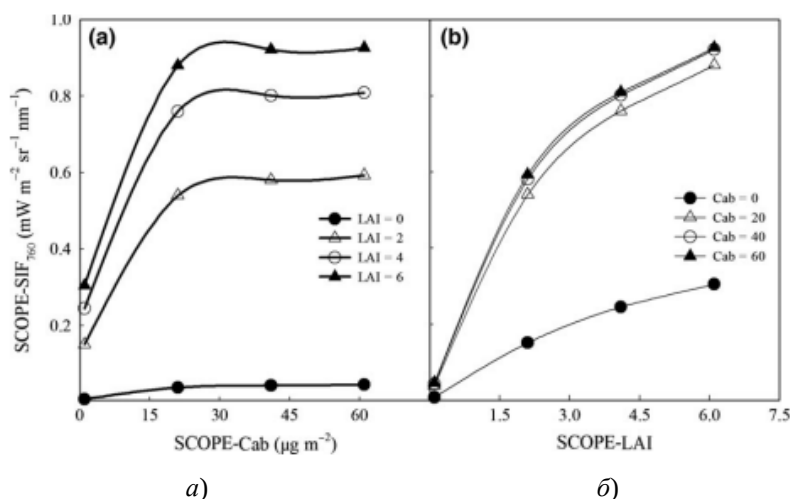


Рис. 1. Графики зависимости SIF от количества хлорофилла в листьях и значения LAI [1]

Используя известные зависимости фенологии растительности от LAI, представленные на рис. 1, и проводя измерения SIF, можно судить о фенологии растительности. Целью настоящей работы является оптимизация исследования фенологии растительности методом измерений индуцированного флуоресцентного излучения хлорофилла и выработка рекомендаций по использованию этого метода.

Материалы и методы

Очевидно, что методика измерения индуцированного флуоресцентного излучения должна быть отработана в условиях неизменности внешнего излучателя, т.е. Солнца. В то же время из-за многочисленных внешних факторов (облака, пыль, дождь и т.д.) достичь постоянства солнечного излучения не удастся и придется проводить исследование на физической модели, заменив солнечное излучение на лазерное излучение определенной длины волны. С этой целью частично воспользуемся результатами работы [10].

Согласно работе [10], для исследования флуоресценции хлорофилла может быть использована лидарная установка на базе лазера, имеющего интенсивность луча на уровне 3 кВт/см². Блок-схема такой установки приведена на рис. 2.

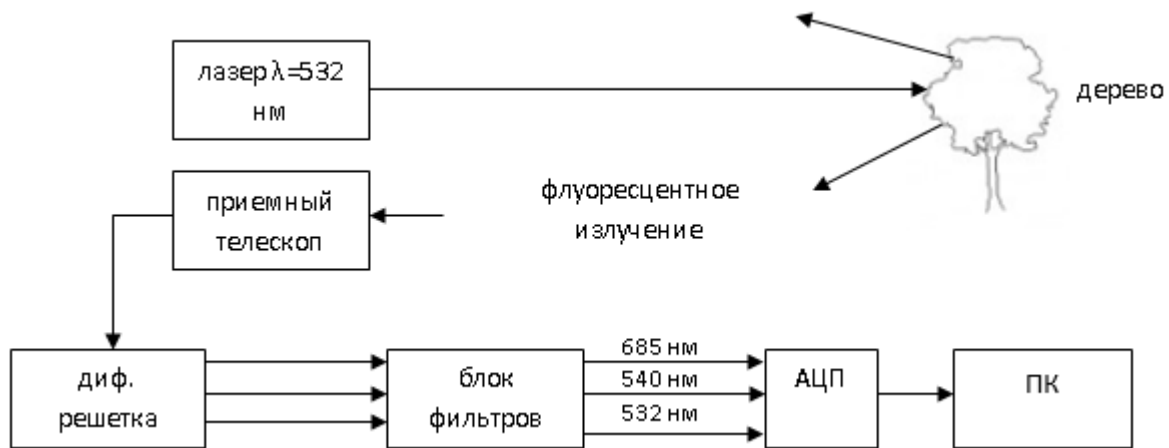


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования флуоресцентного излучения

Согласно работе [10], флуоресцентное излучение хлорофилла на длине волны 685 нм может быть вычислено по следующей формуле:

$$F(685) = c_1 F_0(532) [1 - A(532)] \frac{S}{L^2} \Phi T(532) T(685), \quad (3)$$

где $c_1 = \text{const}$; $F_0(532)$ – интенсивность входного излучения; $A(532)$ – альbedo кроны; S – величина апертуры (диафрагмы) приемного объектива; L – расстояние между лидаром и деревом; Φ – квантовый выход флуоресцентного сигнала; $T(532)$, $T(685)$ – пропускание атмосферы на соответствующих длинах волн.

Отметим, что по сравнению с естественной моделью, включающей солнечное излучение, модель (3) имеет такое преимущество, как возможность учета изменения Φ во времени, что подтверждается графиком, приведенным на рис. 1,б.

С уменьшением LAI в фенологическом цикле разумно предложить, что происходит уменьшение общего количества хлорофилла, приходящего на поперечное сечение лазерного излучения. Таким образом, применительно к линеаризованной модели этой кривой можно ставить вопрос об измерении среднеинтегральной величины $F(685)$ по формуле

$$F_{\text{с.инт}} = \frac{1}{\Phi_{\text{max}}} \int_0^{\Phi_{\text{max}}} F(685) d\Phi. \quad (4)$$

С учетом выражений (3), (4), а также введя на рассмотрение модельную функцию управления

$$L = L(\varphi), \quad (5)$$

можно ставить задачу исследования $F_{\text{с.инт}}$ на экстремум.

Соответствующий целевой функционал при этом имеет вид

$$F_{\text{с.инт}} = \frac{1}{\varphi_{\max}} \int_0^{\varphi_{\max}} c_1 F_0(532) [1 - A(532)] \frac{S}{L^2(\varphi)} \varphi T(532) T(685) d\varphi. \quad (6)$$

Для решения оптимизационной задачи введем некоторое ограничительное условие на искомую функцию $L(\varphi)$, т.е.:

$$\int_0^{\varphi_{\max}} L(\varphi) d\varphi = C; C = \text{const}. \quad (7)$$

На основе выражений (6) и (7) можно составить следующий целевой функционал F_0 безусловной вариационной оптимизации:

$$F_0 = \int_0^{\varphi_{\max}} \frac{c_2 \varphi}{L^2(\varphi)} d\varphi + \lambda \left[\int_0^{\varphi_{\max}} L(\varphi) d\varphi - C \right], \quad (8)$$

где $c_2 = \frac{c_1 F_0(532) [1 - A(532)] S T(532) T(685)}{\varphi_{\max}}$.

Решение (8) согласно работе [11] должно удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ \frac{c_2 S \varphi}{L^2(\varphi)} + \lambda L(\varphi) \right\}}{dL(\varphi)} = 0. \quad (9)$$

Из условия (9) получаем

$$-\frac{2c_2 S \varphi}{L^3(\varphi)} + \lambda = 0. \quad (10)$$

Из выражения (10) находим

$$L(\varphi) = \sqrt[3]{\frac{2c_2 S \varphi}{\lambda}}. \quad (11)$$

Вычислим значение множителя Лагранжа. С учетом выражений (7) и (11) получим

$$\int_0^{\varphi_{\max}} \sqrt[3]{\frac{2c_2 S \varphi}{\lambda}} d\varphi = C. \quad (12)$$

Из выражения (12) находим

$$c_3 \int_0^{\varphi_{\max}} \varphi^{\frac{1}{3}} d\varphi = C, \quad (13)$$

где

$$c_3 = \sqrt[3]{\frac{2c_2 S}{\lambda}}. \quad (14)$$

Из формулы (13) получим

$$\frac{3c_3 \varphi_{\max}^{\frac{4}{3}}}{4} = C. \quad (15)$$

С учетом выражений (14) и (15) получим

$$\frac{3}{4} \sqrt[3]{\frac{2c_2 S}{\lambda}} \varphi_{\max}^{\frac{4}{3}} = C. \quad (16)$$

Из выражения (16) находим

$$\frac{2 \cdot 27}{64} \cdot \frac{c_2 S \varphi_{\max}^4}{\lambda} = C^3$$

или

$$\lambda = \frac{2 \cdot 27}{64} \cdot \frac{c_2 S \varphi_{\max}^4}{C^3}. \quad (17)$$

С учетом выражений (10) и (17) получаем

$$L(\varphi) = \sqrt[3]{\frac{\varphi}{27 \varphi_{\max}^4}} = \frac{4C \sqrt[3]{\varphi}}{3 \varphi_{\max}^{\frac{4}{3}}}. \quad (18)$$

Однако при решении выражения (18) целевой функционал $F_{\text{с.инт}}$ достигает минимума, т.е. производная выражения (9) по искомой функции всегда оказывается положительной величиной.

Следовательно, при реализации условия (18) можно получить минимальную величину измерительного сигнала и, соответственно, минимальное отношение сигнал/шум. В практике исследования фенологии растительности методом измерения флуоресцентного излучения хлорофилла листьев следует учесть, что из-за минимальной информативности условие (18) проведения измерений является нереконструируемым.

Обсуждение

Таким образом, рассмотрена возможность использования флуоресцентного излучения хлорофилла кроны растения для определения фенологической стадии развития растительности. Такая возможность возникает за счет существования однозначной функциональной связи между интенсивностью флуоресцентного излучения и величиной LAI. Для измерения флуоресцентного излучения предлагается использовать лидар на базе лазерного излучения. Замена Солнца на лидарное излучение позволяет исключить погрешности, возникающие из-за нестабильности интенсивности солнечного луча вследствие влияния атмосферных факторов, и определить значение среднеинтегральной величины флуоресцентного излучения. Проведенная оптимизация среднеинтегральной величины флуоресцентного излучения позволила определить наихудший результат, т.е. достижение минимальной величины этого показателя. Во избежание такого результата предложено не реализовывать соответствующие условия, при которых возможно появление наименьшей величины среднеинтегрального значения флуоресцентного сигнала.

Заключение

Показано, что фенологическое развитие растительности может быть изучено, используя результаты измерений флуоресцентного излучения кроны.

При модельном исследовании среднеинтегральной величины флуоресцентного излучения кроны замена Солнца на лазерное излучение позволяет избежать отрицательного влияния атмосферных факторов.

Проведенная оптимизация позволила определить наихудший вариант выбора расстояния между сенсором и растительностью, приводящего к наименьшей величине получаемого значения среднеинтегрального сигнала флуоресценции. Рекомендовано избегать данный режим в практике моделирования флуоресцентного сигнала.

Список литературы

1. Yang H., Yang X., Zhang Y. [et al.]. Chlorophyll fluorescence tracks seasonal variations of photosynthesis from leaf to canopy in a temperate forest // Global Change Biology. 2017. P. 2874–2886.

2. Medlyn B. E. Physiological basis of the light use efficiency model // *Tree Physiology*. 1998. Vol. 18. P. 167–176.
3. Frankenberg C., Fisher J. B., Worden J. [et al.]. New global observations of the ter-restrial carbon cycle from GOSAT: patterns of plant fluorescence with gross primary productivity // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. P. 351–365.
4. Guanter L., Dudhia A., Lewis P. E. [et al.]. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 121. P. 236–256.
5. Guanter L., Zhang Y., Jung M. [et al.]. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. P. 1327–1333.
6. Lee J. E., Frankenberg C., van der Tol C. [et al.]. Forest productivity and water stress in Amazonia: observations from GOSAT chlorophyll fluorescence // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2013. Vol. 280. P. 176–188.
7. Yang X., Tang J., Mustard J. F. [et al.]. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 2977–2987.
8. Lee J. E., Berry J. A., Van der Tol C. [et al.]. Simulations of chlorophyll fluorescence in incorporated into the Community Land Model version 4 // *Global Change Biology*. 2015. Vol. 21. P. 3469–3477.
9. Van G. D., Smedt S., Valcke R. [et al.]. Seasonal, Diurnal and Vertical Variation of Chlorophyll Fluorescence on *Phyllostachys humilis* in Ireland // *PLoS ONE*. 2013. Vol. 8, № 8. e72145. doi: 10.1371/journal.pone.0072145
10. Matvienko G. G., Grishin A. I., Kharchenko O. V., Romanovskii O. A. Application of laser-induced fluorescence for remote sensing of vegetation // *Optical engineering*. 2006. Vol. 45, № 5. doi: 10.1117/1.2202366
11. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. : Наука, 1974. С. 432.

References

1. Yang H., Yang X., Zhang Y. et al. Chlorophyll fluorescence tracks seasonal variations of photosynthesis from leaf to canopy in a temperate forest. *Global Change Biology*. 2017;2874–2886.
2. Medlyn B.E. Physiological basis of the light use efficiency model. *Tree Physiology*. 1998;18:167–176.
3. Frankenberg C., Fisher J.B., Worden J. et al. New global observations of the ter-restrial carbon cycle from GOSAT: patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophysical Research Letters*. 2011;38:351–365.
4. Guanter L., Dudhia A., Lewis P.E. et al. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements. *Remote Sensing of Environment*. 2012;121:236–256.
5. Guanter L., Zhang Y., Jung M. et al. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014;111:1327–1333.
6. Lee J.E., Frankenberg C., van der Tol C. et al. Forest productivity and water stress in Amazonia: observations from GOSAT chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2013;280:176–188.
7. Yang X., Tang J., Mustard J.F. et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest. *Geophysical Research Letters*. 2015;42:2977–2987.
8. Lee J.E., Berry J.A., Van der Tol C. et al. Simulations of chlorophyll fluorescence in incorporated into the Community Land Model version 4. *Global Change Biology*. 2015;21:3469–3477.
9. Van G.D., Smedt S., Valcke R. et al. Seasonal, Diurnal and Vertical Variation of Chlorophyll Fluorescence on *Phyllostachys humilis* in Ireland. *PLoS ONE*. 2013;8(8):e72145. doi: 10.1371/journal.pone.0072145
10. Matvienko G.G., Grishin A.I., Kharchenko O.V., Romanovskii O.A. Application of laser-induced fluorescence for remote sensing of vegetation. *Optical engineering*. 2006;45(5). doi: 10.1117/1.2202366
11. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie = Differential equations and calculus of variations*. Moscow: Nauka, 1974:432. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Фахраддин Гюльали оглы Агаев

доктор технических наук, профессор,
директор Института космических
исследований природных ресурсов,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: director.tekti@mail.ru

Fakhraddin Gulali oglu Agayev

Doctor of technical sciences, professor,
director of Institute of Space Researches
of Natural Resources,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Хикмет Гамид оглы Асадов

доктор технических наук, профессор,
начальник отдела НИИ
Аэрокосмической информатики,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: asadzade@rambler.ru

Hikmat Hamid oglu Asadov

Doctor of technical sciences, professor,
head of the department of Research Institute
of Aerospace Informatics,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Мерадж Эльдар оглы Омаров

докторант,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: meracomarov@gmail.com

Meradj Eldar oglu Omarov

Doctoral student,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Севда Салман гызы Алиева

кандидат технических наук,
начальник отдела,
Институт экологии,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: sevdaaliyeva06.01@gmail.com

Sevda Salman gizi Aliyeva

Candidate of technical sciences,
head of the department,
Institute of Ecology,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

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

Поступила в редакцию/Received 14.08.2024

Поступила после рецензирования/Revised 09.09.2024

Принята к публикации/Accepted 02.10.2024

ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

Ю. М. Скрыбин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
meh-record@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Настоящее исследование относится к области локации летательных аппаратов с помощью информационно-измерительной системы электростатической локации. Для локации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) необходимо определить признаки электростатического сигнала с нескольких датчиков. В зависимости от соотношения сигнал/шум признаки определяются с погрешностью, которая влияет на погрешность определения координат БПЛА. *Материалы и методы.* Для анализа погрешности использовалась математическая модель работы системы электростатической локации. Определено влияние погрешности на основе методики расчета погрешности косвенных измерений. *Результаты.* Получены уравнения расчета координат БПЛА и их погрешность при различных сочетаниях параметров пролета и уровня сигнал/шум. *Выводы.* Погрешность пролета БПЛА можно уменьшить путем совместного использования вейвлет-функции Морле и рациональной функции в качестве анализирующей, а также за счет использования трехрядной схемы расположения датчиков.

Ключевые слова: электростатический сигнал, электростатический мониторинг, электростатическая локация, цифровая обработка сигналов, время-частотное распределение

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90028.

Благодарности: выражаю благодарность своему научному руководителю Потехину Дмитрию Станиславовичу за критику настоящего исследования.

Для цитирования: Скрыбин Ю. М. Влияние помех на точность определения местоположения летательного аппарата информационно-измерительной системой электростатической локации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 20–29. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-3

THE INFLUENCE OF NOISE ON THE ACCURACY OF DETERMINING THE LOCATION OF AN AIRCRAFT BY AN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF ELECTROSTATIC LOCATION

Yu.M. Scryabin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
meh-record@yandex.ru

Abstract. *Background.* This research relates to the field of aircraft location using an information and measurement system of electrostatic location. To locate aircraft, it is necessary to determine the signs of an electrostatic signal from several sensors. Depending on the signal-to-noise ratio, the signs are determined with an error that affects the error in determining the coordinates of the UAV. *Materials and methods.* A mathematical model of the operation of the electrostatic location system was used to analyze the error. The influence of the error is determined based on the method of calculating the error of indirect measurements. *Results.* The equations for calculating the coordinates of the UAV and their error are obtained for various combinations of flight parameters and signal/noise values. *Conclusions.* The error of the UAV flight can be reduced by combining the Morlaix wavelet function and the rational function as an analyzing one, as well as by using a three-row sensor layout.

Keywords: electrostatic signal, electrostatic monitoring, electrostatic location, digital signal processing, time-frequency distribution

Financing: the research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of a scientific project № 20-37-90028.

Acknowledgements: I would like to thank my supervisor Dmitry Stanislavovich Potekhin for his criticism of this study.

For citation: Scryabin Yu.M. The influence of noise on the accuracy of determining the location of an aircraft by an information and measurement system of electrostatic location. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):20–29. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-3

Введение

Большое распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и частое нарушение ими частных или государственных границ требует серьезного отношения к развитию систем их детектирования и нейтрализации. Радиолокационные средства разведки, которые показали свою эффективность для обнаружения пилотируемых летательных аппаратов, имеют затруднения с обнаружением малых низковысотных летательных аппаратов ввиду их малой эффективной площади рассеяния и отражения радиоволн от подстилающей поверхности (ПП). Кроме того, необходимо соблюдать экологические нормы по уровню радиоизлучений [1].

В настоящее время для увеличения вероятности обнаружения БПЛА используется объединение радиолокационных средств разведки со средствами на иной физической природе: радиотехнической, оптической, звуковой [2]. Потенциально определенными преимуществами обладает принцип электростатической локации [3–5].

Принцип электростатической локации заключается в том, что любой объект, перемещающийся в атмосфере, несет на себе электростатический заряд. Траекторию движения данного заряда можно определить из анализа создаваемых им возмущений электростатического поля в разных точках ПП [6].

Для измерения возмущений электростатического поля существуют и используются два основных типа измерителя: электростатический зонд и электростатический флюксометр. Электростатические зонды имеют большую практику применения в сфере электростатического мониторинга состояния технических объектов путем детектирования движения заряженных частиц в потоке жидкости или газа [7, 8]. Электростатические флюксометры до настоящего времени по большей части использовались в сфере метеонаблюдений, но последние усовершенствования их помехоустойчивости позволяют рассчитывать на их успешное использование в сфере электростатической локации [9, 10].

В работе [6] были выведены идеальные функции электростатического сигнала на основе математической модели, которые представлены на рис. 1.

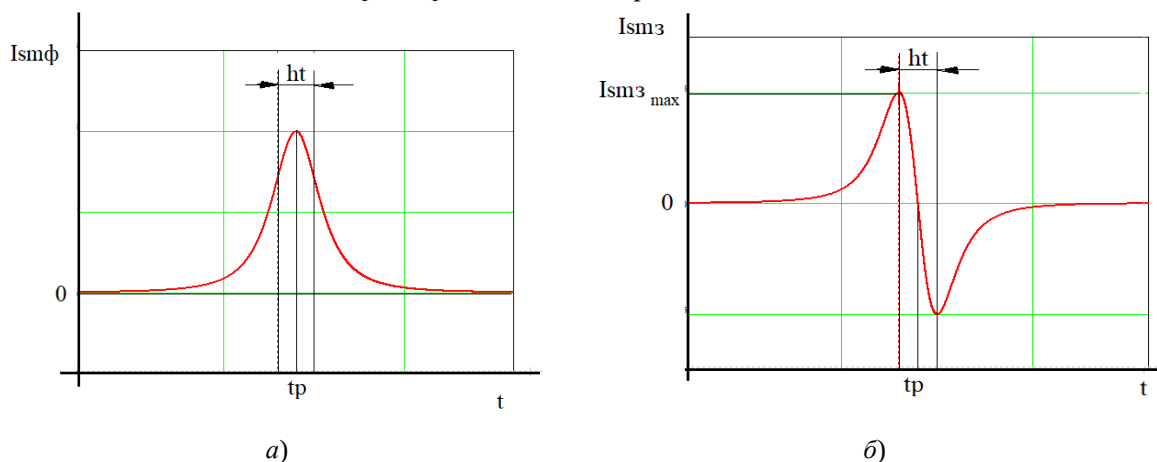


Рис. 1. Идеальные измерительные сигналы:
а – электростатического флюксометра; б – электростатического зонда

Для определения траектории БПЛА достаточно временного t_p и частотного признака ht электростатического сигнала, полученного от трех датчиков [6]. Траектория БПЛА задается

четырьмя геометрическими параметрами, которые представлены на рис. 2: скоростью v , высотой пересечения периметра h , горизонтальным углом пересечения α и координатой пересечения p относительно первого датчика (рис. 2). Для решения задачи также необходимо знать расстояние между датчиками s .

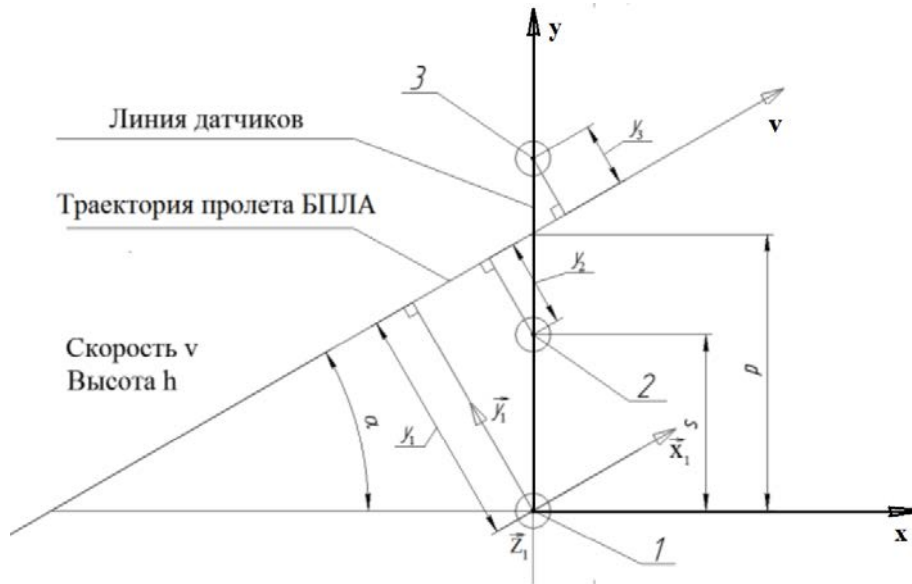


Рис. 2. Траектория БПЛА. Вид сверху

На рис. 2 БПЛА пересекает охраняемый периметр, образуемый цепочкой электростатических датчиков, вдоль оси x . Для определения параметров траектории используются три датчика, пронумерованные на рис. 2 в порядке появления на них центра электростатического сигнала 1, 2 и 3.

В предшествующем исследовании [11] были разработаны алгоритмы цифровой обработки сигнала на основе свертки модифицированной вейвлет-функцией Морле и с рациональной анализирующей функцией. Для данных функций выявлена погрешность определения параметров ht и tp в зависимости от абсолютного уровня помех.

Целью настоящей работы является оценка точности метода электростатической локации в зависимости от погрешности определения признаков электростатического сигнала.

Для достижения поставленной цели необходимо рассчитать и проанализировать погрешность определения координат для всего множества возможных сочетаний параметров пролета БПЛА.

Материалы и методы

Для определения погрешности используется математическая модель задачи электростатической локации БПЛА из предыдущего исследования [6]. Согласно решению данной задачи параметры пролета БПЛА связаны со спектральными характеристиками сигнала следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} v^2 ht_1^2 = h^2 + p^2 \cos^2 \alpha; \\ v^2 ht_2^2 = h^2 + (p-s)^2 \cos^2 \alpha; \\ v^2 ht_3^2 = h^2 + (2s-p)^2 \cos^2 \alpha; \\ v^2 (tp_3 - tp_1)^2 = 4s^2 \sin^2 \alpha; \\ v^2 (tp_3 - tp_2)^2 = s^2 \sin^2 \alpha. \end{cases} \quad (1)$$

Погрешность локации БПЛА определяется как погрешность косвенных измерений [12]:

$$\Delta z_{loc} = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_1} ht_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_2} ht_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_3} ht_3 \right)^2 \right) \varepsilon_{ht}^2 + \left(\frac{\partial z_{loc}}{\partial (tp_3 - tp_1)} \frac{(ht_3 + ht_1)}{2} \right)^2 \left(\sqrt{2} \cdot \frac{\Delta tp}{ht_i} \right)^2}, \quad (2)$$

где Δz_{loc} , $\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_1}$, $\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_2}$, $\frac{\partial z_{loc}}{\partial ht_3}$, $\frac{\partial z_{loc}}{\partial (tp_3 - tp_1)}$ являются функциями от ht_1 , ht_2 , ht_3 и $tp_3 - tp_1$; $\varepsilon_{ht} = \frac{\Delta ht}{ht}$ –

относительная погрешность определения ht ; $\frac{\Delta tp}{ht_i}$ – приведенная (относительная) погрешность определения tp .

Вид формулы (2) обусловлен тем, что цифровые методы обработки сигналов дают относительные погрешности ε_{ht} и $\Delta tp/ht_i$, которые напрямую не зависят от параметров пролета БПЛА или признаков электростатических сигналов. Данные погрешности зависят от соотношения сигнал/шум. Следует отметить, что амплитуда сигнала электростатического зонда согласно работе [6] прямо пропорциональна $\sqrt[3]{v/h}$, а электростатического флюксметра $\sqrt{v/h}$.

Для анализа влияния погрешности признаков электростатического сигнала на точность локации БПЛА при различных параметрах пролета была составлена расчетная программа с визуализацией результатов.

Входными данными для расчетной программы являются параметры пролета БПЛА v , h , $\cos \alpha$, p . Выходными данными являются погрешности определения $\Delta x_{loc}(v, h, \cos \alpha, p)$, $y_{loc}(v, h, \cos \alpha, p)$ и $z_{loc}(v, h, \cos \alpha, p)$ в виде 5-мерного распределения от входных данных.

Расчет выходных данных осуществлялся в следующем порядке:

1. На основе первых четырех уравнений системы (1) с подстановкой входных данных рассчитывались точные значения признаков электростатических сигналов ht_1 , ht_2 , ht_3 и $tp_3 - tp_1$.
2. На основе точных признаков электростатических сигналов рассчитываются погрешности определения v , h , $\cos \alpha$, p по формуле при относительной погрешности $\varepsilon_{ht} = 1\%$ и $\varepsilon_{tp} = 0$, а также при относительной погрешности $\varepsilon_{ht} = 0$ и $\varepsilon_{tp} = 1\%$.
3. На основе полученных погрешностей Δv , Δh , $\Delta \cos \alpha$, Δp определяют погрешность Δx_{loc} , Δy_{loc} и Δz_{loc} как косвенных измерений.

Определение погрешности локации БПЛА

Спектральный анализ согласно предложенному ранее алгоритму [11] определяет местоположение БПЛА после пролета последней точки траектории на дистанцию, определяемую временем $5ht_3$. Это время необходимо, чтобы последний фиксирующий БПЛА датчик под номером 3 получил полный электростатический сигнал. Считается, что система электростатической локации должна определить для этого момента времени положение БПЛА для посылки более мощного радиопульса в ту область пространства. Согласно уравнениям кинематики координаты БПЛА для момента времени $t_{loc} = t_3 + 5ht_3$ можно определить по следующим уравнениям:

$$\begin{cases} x_{loc} = 5ht_3 v \cos \alpha + y_3 \cos \alpha; \\ y_{loc} = 5ht_3 v \sin \alpha + y_3 \sin \alpha + p; \\ z_{loc} = h. \end{cases} \quad (3)$$

Система уравнений (3) определяет координаты БПЛА x_{loc} , y_{loc} и z_{loc} в системе координат, где ось y направлена от первого датчика в сторону третьего по рис. 2. Старая система координат с осью x , направленной по движению БПЛА, неудобна для решения данной задачи и использовалась ранее для вывода системы уравнений (1).

Система уравнений (3) показывает, что БПЛА улетает от линии периметра к моменту его локации на расстояние, определяемое катетом прямоугольного треугольника с третьим датчиком в вершине и расстоянием, которое БПЛА успеет преодолеть за время ht . При расчете координаты y следует учесть смещение на p .

Точность решения будет определяться погрешностью Δs как суммой квадратов абсолютных погрешностей координат БПЛА, определяемых уравнением (3), записанным через признаки сигнала tp_j и ht_j . Выражение параметров α , v , p и h через признаки сигнала осуществляется через систему уравнений (1). Для выражения y_3 используется следующее тождество:

$$vht_i = \sqrt{h^2 + y_i^2}. \quad (4)$$

Погрешность определения положения БПЛА по уравнению (2) определяется как результат косвенных измерений на основании погрешности признаков сигнала Δht и Δtp . Особенно здесь важен факт того, по каким уравнениям рассчитываются значения параметров движения БПЛА через периметр v , p , h и α . Данные уравнения зависят от порядка выражения данных параметров. В предыдущей работе [6] был приведен наиболее быстрый с точки зрения скорости выражения алгоритм выражения данных параметров из системы (1). Как было проверено с помощью символьных вычислений, данный подход скорее приводит к наиболее наилучшим уравнениям с точки зрения отношения погрешности выражения параметров v , p , h и α к погрешности определения признаков ht и tp , кроме одного шага.

Рассмотрим наилучший способ выражения параметров v , p , h и α и сравним его с порядком выражения из работы [6]. Первым действием выгодно выразить параметр p . Это, похоже, единственный параметр, который можно выразить независимо от признака времени tp на основе первых трех уравнений системы (1) с четырьмя неизвестными. Для этого h переносится в левую часть и приравниваются правые части с получением двух независимых уравнений с тремя неизвестными. Путем переноса в левую часть слагаемых с $\cos(\alpha)$, а в правую с v и последующим делением двух уравнений друг на друга можно избавиться сразу от двух неизвестных, потеряв только одно независимое уравнение. В результате параметр p рассчитывается по следующей формуле:

$$p = s \frac{3ht_1^2 - 4ht_2^2 + ht_3^2}{2ht_1^2 - 4ht_2^2 + 2ht_3^2}. \quad (5)$$

На первый взгляд возможна ситуация, когда знаменатель (5) будет равен (или близок) к нулю и погрешность результата уравнения (5) будет сильно зависеть от погрешностей определения признака частоты. Однако такая ситуация на практике не осуществится по той причине, что для этого необходимо, чтобы признак ht_2 был близок к полусумме признаков ht_1 и ht_3 . Однако данный признак прямо зависит от расстояния между датчиками и траекторией полета БПЛА согласно уравнению (4). А второй датчик по алгоритму является наиболее близким к данной траектории. Близость знаменателя к нулю возможна при большом значении соотношения h к s , но данное соотношение не выполняется ввиду профиля границы обнаружения БПЛА датчиком и рекомендуемых характеристиках сети датчиков, которые выведены в работе [6].

Далее можно вывести скорость БПЛА v и угол пересечения периметра α . Высота h при этом не может быть выражена при неизвестной v и α . Для их вывода необходимо убрать одно из первых трех уравнений в системе (1). Для решения проще всего перейти к одной тригонометрической функции. В итоге при исключении первого или третьего уравнения получается формула для расчета v соответственно:

$$v = 2 \sqrt{\frac{s^2}{2ht_1^2 - 4ht_2^2 + 2ht_3^2 + (tp_3 - tp_1)^2}}. \quad (6)$$

Оставшиеся два параметра – α и h . Однако так как сам угол не требуется для получения текущего местоположения БПЛА, то достаточно выразить значения $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$:

$$\cos \alpha = \sqrt{2} \sqrt{\frac{ht_1^2 - 2ht_2^2 + ht_3^2}{2ht_1^2 - 4ht_2^2 + 2ht_3^2 + (tp_3 - tp_1)^2}}; \quad (7)$$

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2s^2(ht_1^4 - 8ht_1^2ht_2^2 - 2ht_1^2ht_3^2 + 16ht_2^4 - 8ht_2^2ht_3^2 + ht_3^4)}{(2ht_1^2 - 4ht_2^2 + 2ht_3^2 + (tp_3 - tp_1)^2)(ht_1^2 - 2ht_2^2 + ht_3^2)}}. \quad (8)$$

Погрешность локации БПЛА Δz_{loc} определяется по формуле (2), примененной к выражению (8). Погрешности определения других координат Δx_{loc} и Δy_{loc} уже зависят от погрешности определения v , h , $\cos \alpha$ и в случае последней еще и p . Для избавления от громоздких выражений их учет будет учитываться в два шага. Предполагается, что информационно-измерительная система сначала рассчитывает v , h , $\cos \alpha$, p на основе признаков электростатического сигнала. Их погрешности определяются по формуле, аналогичной (8). Затем на их основе рассчитываются x_{loc} и y_{loc} и их погрешности считаются как погрешности косвенных измерений от ошибок Δv , Δh , $\Delta \cos \alpha$, Δp .

Результаты

Кроме этого, необходимо проанализировать погрешность для практических диапазонов изменения h , p , $\cos \alpha$ и v . Диапазон изменения скорости v оказался неважен, так как она влияет только на ошибку определения самой скорости и влияние на определение координаты оказывается минимальное. Диапазоны остальных величин при $s = 30$ (м) следующие: $0 \leq \cos \alpha \leq 0,5$; $0,5s \leq p \leq 1,5s$; $3 \leq h \leq 30$. Диапазон p ограничен самим алгоритмом, при выходе p за указанный диапазон выбираются другие три датчика, чьи сигналы будут наиболее сильными [6]. Диапазон h определен согласно теоретическому диапазону высот, на которых летательный аппарат может быть определен между датчиками согласно расчетам.

Результаты проведенного анализа более наглядно могут быть представлены в виде графиков на рис. 3 при $p = s = 30$ (м) и рис. 4 при $p = s/2 = 15$ (м). От скорости v данные графики практически не зависят.

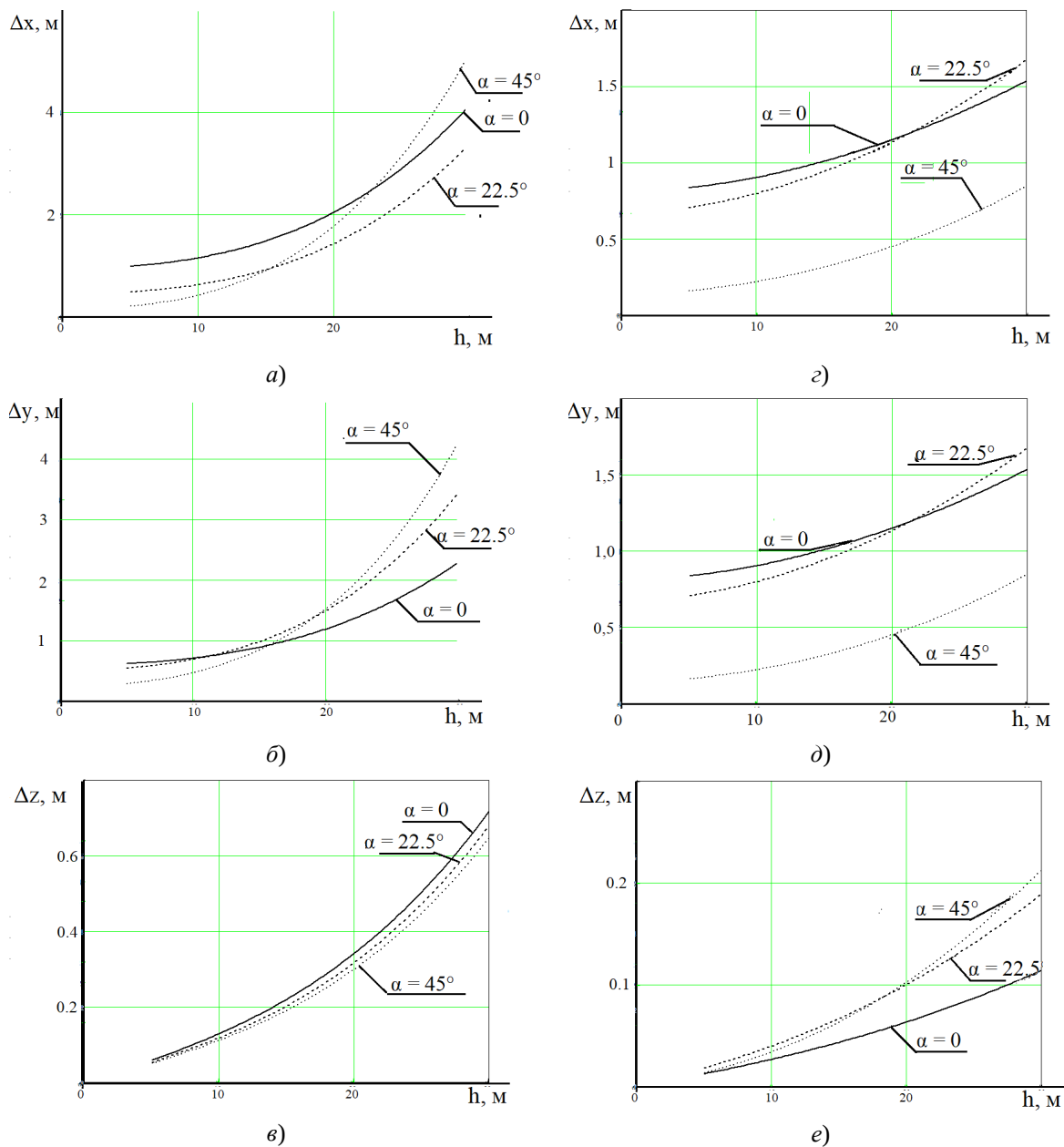


Рис. 3. Зависимость ошибки от высоты и угла пересечения периметра при $p = s$:
 а – $\Delta x_{ht}(h)$; б – $\Delta y_{ht}(h)$; в – $\Delta z_{ht}(h)$; г – $\Delta x_{tp}(h)$; д – $\Delta y_{tp}(h)$; е – $\Delta z_{tp}(h)$

Исходя из графиков рис. 3 и 4 получается, что влияние погрешности определения частотного признака в несколько раз выше, чем влияние погрешности определения признака времени. Погрешность определения координат на горизонтальной плоскости в несколько раз выше, чем погрешность определения высоты.

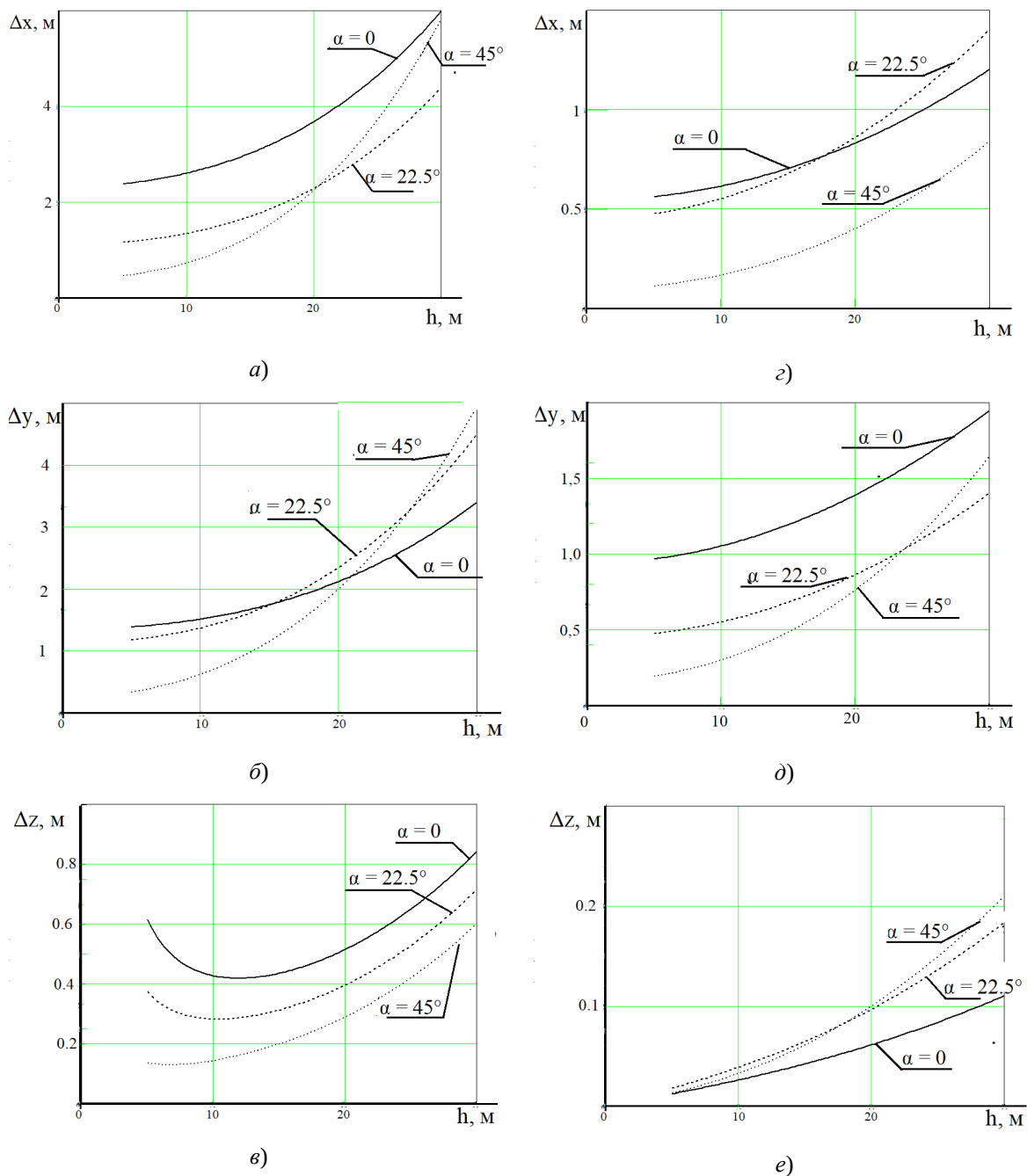


Рис. 4. Зависимость ошибки от высоты и угла пересечения периметра при $p = s/2$:
 $a - \Delta x_{ht}(h)$; $б - \Delta y_{ht}(h)$; $в - \Delta z_{ht}(h)$; $г - \Delta x_{tp}(h)$; $д - \Delta y_{tp}(h)$; $е - \Delta z_{tp}(h)$

На основе приведенных в данной статье расчетов (для ошибки в 1 %) и результатов предыдущей работы [11] можно составить таблицу ошибки определения координаты БПЛА системой электростатической локализации для условий скорости полета 5 м/с, высоты полета 20 м и пересечения периметра по нормали ($\alpha = 0$) над одним из электростатическим датчиков ($p = s = 20$).

Таблица 1

Погрешности определения координат БПЛА

Анализирующая функция	Сигнал/шум	ε_{ht} , %	ε_{tp} , %	Δx , м	Δy , м	Δz , м
Вейвлет Морле	3	0	2 %	1,5	2,6	0,1
	2	0	4 %	3	5,2	0,2
Рациональная функция	3	0,1 %	0,1 %	0,39	0,41	0,05
	2	1,1 %	1 %	4,5	3,6	0,55

Обсуждение

Существует сложная зависимость между погрешностью определения координат БПЛА и углом входа. В целом можно сказать, что для низких высот наибольшая погрешность определения координат возникает при нормальном пересечении периметра датчиков. С увеличением высоты ситуация меняется на противоположную, но в первую очередь при достаточно больших углах между нормалью к периметру и углом пересечения границы и отклонении от центрального датчика (p близком к $1/2s$ или $3/2s$).

Это способствует мысли использования трехрядной системы расположения датчиков (рис. 5) для уменьшения погрешности.

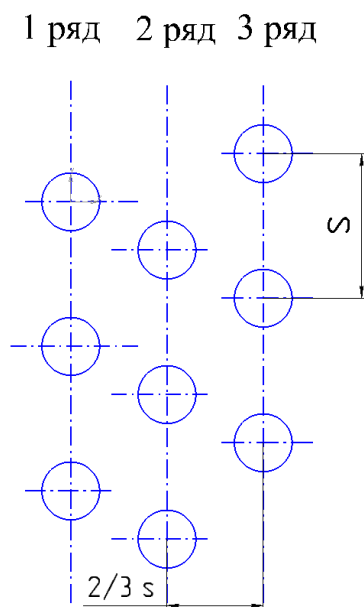


Рис. 5. Трехрядное расположение датчиков

При использовании трехрядной схемы можно использовать не только тройку датчиков из соответствующего ряда, для которой p максимально близко к s , но и использовать датчики из разных рядов, обеспечивая другие углы α между траекторией БПЛА и нормалью к линии датчиков, т.е. те, для которых погрешность определения координат является наименьшей. Также из-за возможности использования нескольких групп датчиков для одной и той же цели можно разработать алгоритм определения признаков на основе их измерений.

В случае снижения расстояния между датчиками значительно вырастают погрешности определения координаты x . С другой стороны, естественно, что увеличивается соотношение сигнал/шум, однако если расстояние между датчиками выбрано из требований, изложенных в работе [12], то дополнительный выигрыш не превышает 5 %.

Заключение

Метод электростатической локации, основанный на измерении напряженности электростатического поля, на основе приведенного алгоритма позволяет определить местоположение одиночного равномерно летящего объекта над ровной поверхностью с погрешностью, не превышающей 1 м при соотношении сигнал/шум больше или равным 3. Уменьшение погрешности в выбранных условиях может быть целесообразным путем использования трехрядной границы электростатических датчиков для возможности локации БПЛА на основе сигналов с датчиков, расположенных под другим углом к траектории полета БПЛА, а также одновременном расчете признака частоты с помощью вейвлет-функции Морле и признака времени при использовании рациональной функции.

Список литературы

1. Сенцов А. А., Поляков В. Б., Иванов С. А. Помозова Т. Г. Метод перехвата малоразмерных и малозаметных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2023. № 129. С. 1–30. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID = 173033>

2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 101–146.
3. Ластовецкий А. Е., Клепка С. П., Рябokonь М. С. Дистанционное измерение электрических зарядов воздушных объектов // Вестник концерна ПВО Алмаз-Антей. 2015. № 3. С. 59–69.
4. Борзов А. Б. Электрическая модель летательного аппарата в задачах ближней электростатической локализации воздушных целей // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 12. С. 1159–1167.
5. Chubb J. The measurement of atmospheric electric fields using pole mounted electrostatic fieldmeters // Journal of Electrostatics. 2014. № 72. P. 295–300.
6. Скрябин Ю. М., Потехин Д. С. Определение траектории горизонтального пролета беспилотного летательного аппарата через линию электростатических датчиков // Труды МАИ. 2019. № 106. С. 1–19. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105747>
7. Zhenhua W., Junxing Ho., Jason A. A review of electrostatic monitoring technology: The state of the art and future research directions // Progress in Aerospace Sciences. 2017. Vol. 2, iss. 1. P. 1–11.
8. Yong Y., Yonghui H., Lijuan W. [et al.]. Electrostatic sensors – Their principles and applications // Measurement. 2022. № 169. P. 153–183.
9. Патент 2722477 Российская Федерация. Электростатический флюксметр / Потехин Д. С., Скрябин Ю. М., Тетерин Е. П. № 2019123353 ; заявл. 24.07.2019 ; опубл. 01.06.2020.
10. Бирюков С. В. Предпосылки создания прибора для измерения напряженности электрического поля с определением погрешности результата измерений // Информационные технологии и средства обучения. 2023. № 7. С. 1–7.
11. Скрябин Ю. М., Потехин Д. С. Рациональная анализирующая функция для точного определения параметров электростатического сигнала // Труды МАИ. 2021. № 119. С. 1–32. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159792>
12. Пухаренко Ю. В., Норин В. А. Статистическая обработка результатов измерений. М. : Лань, 2021. 236 с.

References

1. Sentsov A.A., Polyakov V.B., Ivanov S.A. Pomozova T.G. Metod intercepts small-sized and inconspicuous flying devices. *Trudy MAI = Proceedings of the MAI*. 2023;(129):1–30. (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173033>
2. Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasil'chenko A.S. Analysis of means and methods of countering unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned Aerial Vehicle as an object of detection and Damage. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control systems, communications and security*. 2020;(1):101–146. (In Russ.)
3. Lastovetskiy A.E., Kleпка S.P., Ryabokon' M.S. Remote measurement of electric charges of air objects. *Vestnik kontserna PVO Almaz-Antey = Bulletin of the Almaz-Antey Air Defense concern*. 2015;(3):59–69. (In Russ.)
4. Borzov A.B. Electrical model of an aircraft in the problems of near electrostatic location of air targets. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and electronics*. 2016;61(12):1159–1167. (In Russ.)
5. Chubb J. The measurement of atmospheric electric fields using pole mounted electrostatic fieldmeters. *Journal of Electrostatics*. 2014;(72):295–300.
6. Skryabin Yu.M., Potekhin D.S. Determination of the horizontal flight path of an unmanned aerial vehicle through a line of electrostatic sensors. *Trudy MAI = Proceedings of the MAI*. 2019;(106):1–19. (In Russ.). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105747>
7. Zhenhua W., Junxing Ho., Jason A. A review of electrostatic monitoring technology: The state of the art and future research directions. *Progress in Aerospace Sciences*. 2017;2(1):1–11.
8. Yong Y., Yonghui H., Lijuan W. et al. Electrostatic sensors – Their principles and applications. *Measurement*. 2022;(169):153–183.
9. Patent 2722477 Russian Federation. Electrostatic fluxmeter. Potekhin D.S., Skryabin Yu.M., Teterin E.P. No. 2019123353; appl. 24.07.2019; publ. 01.06.2020. (In Russ.)
10. Biryukov S.V. Prerequisites for the creation of a device for measuring the electric field strength with the determination of the measurement result error. *Informatsionnye tekhnologii i sredstva obucheniya = Information technologies and learning tools*. 2023;(7):1–7. (In Russ.)
11. Skryabin Yu.M., Potekhin D.S. Rational analyzing function for accurate determination of electrostatic signal parameters. *Trudy MAI = Proceedings of the MAI*. 2021;(119):1–32. (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159792>
12. Pukharenko Yu.V., Norin V.A. *Statisticheskaya obrabotka rezul'tatov izmereniy = Statistical processing of measurement results*. Moscow: Lan', 2021:236. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors**Юрий Михайлович Скрябин**

преподаватель кафедры вычислительной техники,

МИРЭА – Российский технологический

университет

(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)

E-mail: meh-record@yandex.ru.

Yuriy M. Skryabin

Lecturer of the sub-department

of computer engineering,

MIREA – Russian Technological University

(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**The author declares no conflicts of interests.****Поступила в редакцию/Received 11.07.2024****Поступила после рецензирования/Revised 05.08.2024****Принята к публикации/Accepted 03.09.2024**

ВЫБОР ПРОТОТИПА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЕЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ

С. С. Верхушин¹, В. И. Мищенко², И. В. Мищенко³, К. Н. Исаков⁴

^{1, 2, 3, 4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

^{1, 2, 3, 4} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проведен анализ работ, посвященных моделированию процесса функционирования измерительного канала измерительной системы наземного технологического оборудования. Проведено обоснование, что одним из перспективных направлений моделирования процессов функционирования измерительных систем наземного технологического оборудования испытательных космодромов является использование теории марковских и полумарковских процессов. *Материалы и методы.* Рассмотрены известные полумарковские модели, которые позволяют обосновать периодичность контроля технического состояния измерительной системы наземного технологического оборудования. Определено, что все полумарковские модели опираются на известный закон распределения, вместе с тем на этапе проектирования такое предположение неуместно. *Результаты и выводы.* Предложена модель процесса функционирования измерительного канала многоканальной измерительной системы при ограниченной информации о ее надежности.

Ключевые слова: измерительная система, безотказность, интервал между поверками, аппаратура контроля, контроль технического состояния, полумарковский процесс

Для цитирования: Верхушин С. С., Мищенко В. И., Мищенко И. В., Исаков К. Н. Выбор прототипа модели процесса функционирования измерительного канала многоканальной измерительной системы для расчета ее коэффициента готовности при ограниченной информации о надежности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 30–39. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-4

SELECTION OF A PROTOTYPE MODEL OF THE PROCESS OF FUNCTIONING OF THE MEASURING CHANNEL OF A MULTICHANNEL MEASURING SYSTEM FOR CALCULATING ITS AVAILABILITY COEFFICIENT WITH LIMITED INFORMATION ABOUT RELIABILITY

S.S. Verkhushin¹, V.I. Mishchenko², I.V. Mishchenko³, K.N. Isakov⁴

^{1, 2, 3, 4} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

^{1, 2, 3, 4} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* The article analyzes the works devoted to modeling the process of functioning of the measuring channel of the measuring system of ground-based technological equipment. The substantiation is carried out that one of the promising directions of modeling the processes of functioning of measuring systems of ground-based technological equipment of test cosmodromes is the use of the theory of Markov and semi-Markov processes. *Materials and methods.* The well-known semi-Markov models are considered, which make it possible to justify the frequency of monitoring the technical condition of the measuring system of ground-based technological equipment. It is determined that all semi-Markov models are based on the well-known distribution law, however, at the design stage such an assumption is inappropriate. *Results and conclusions.* A model of the process of functioning of the measuring channel of a multichannel measuring system with limited information about its reliability is proposed.

Keywords: measuring system, reliability, interval between checks, control equipment, technical condition control, semi-Markov process

For citation: Verkhushin S.S., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V., Isakov K.N. Selection of a prototype model of the process of functioning of the measuring channel of a multichannel measuring system for calculating its availability coefficient with limited information about reliability. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2024;(4):30–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-4

Введение

Анализ современных тенденций и перспектив развития геополитической обстановки свидетельствует о том, что использование космического пространства и возможностей космических систем во всем мире оценивается как один из важнейших факторов политической, военной и экономической безопасности государства.

Для подготовки ракет космического назначения (РКН) и космических аппаратов (КА) используется наземное технологическое оборудование технического и стартового комплексов испытательных космодромов.

В качестве основного наземного технологического оборудования космодромов используются измерительные системы (ИС). Они применяются для комплектования систем управления, используемых для подготовки и пуска РКН различных классов, и предназначены для измерения и преобразования значений сигналов, поступающих от первичных измерительных преобразователей, регистрации и отображения результатов измерений. В состав ИС наземного технологического оборудования входят измерительные каналы измерений величин, преобразователи измерительные, модули, контроллеры, источники питания и средства отображения информации. В свою очередь измерительные каналы (ИК) применяются для измерения различных физических величин (напряжение, сила тока, сопротивление и т.д.) и являются отдельным типом средства измерения.

Постоянное расширение задач, наращивание орбитальной группировки (ОГ), испытание новых типов КА, а также усложнение порядка функционирования РКН приводит к усложнению специального аппаратного и программного обеспечения, наземных средств, объектов управления и технологического оборудования. Также решение задач, стоящих перед испытательными космодромами и пунктами управления КА, в настоящее время во многом определяется разработкой, внедрением новых и совершенствованием существующих ИС.

Традиционно показатели надежности проектируемых и вновь создаваемых ИС при отсутствующей статистической информации о надежности представляют собой усредненные значения по основным узлам (системам, элементам), которые в дальнейшем не оказывают эффективного влияния на процесс функционирования ИС.

В свою очередь имеющаяся система технического обслуживания и метрологическое обслуживание ИС, предусматривающие проведение планово-предупредительного обслуживания (ремонта), а также определение метрологических характеристик не в полной мере позволяют спрогнозировать и своевременно обнаружить возникающие неисправности и отказы. Следовательно, актуальной и в теоретическом, и в прикладном плане является задача обоснования сроков проведения вышеуказанных работ при ограниченной информации о надежности ИС. При этом определение сроков проведения как восстановительных, так и профилактических работ, как показывают результаты исследования, существенно зависит от выбранной или разработанной модели процесса функционирования ИС.

Таким образом, для решения поставленных задач необходимо провести выбор прототипа или разработать модель процесса функционирования ИК ИС наземного технологического оборудования, в комплексе учитывающую основные характеристики процесса их эксплуатации.

Моделирование процессов функционирования ИК ИС наземного технологического оборудования позволит обосновать стратегию метрологического обслуживания при ограниченной информации о надежности и обеспечить требуемые значения.

Под ограниченной информацией о надежности понимается отсутствие информации о законе распределения вероятностей наработки на отказ, а имеющаяся статистическая информация достаточна для определения оценок одного или двух моментов.

*Анализ и обоснование моделей функционирования,
и оценка результативности метрологического обслуживания ИС*

Использование моделей процесса функционирования ИК ИС является одним из перспективных направлений обоснования стратегии метрологического обслуживания ИС.

Для обоснования периодичности метрологического обслуживания ИК ИС необходимо определить интервал между поверками (ИМП) и оценку результативности функционирования ИС. Традиционно для этого используются комплексные показатели надежности на основании статистических (аналогичных) данных (систем) и параметров функционирования подсистем ИС относительно допусковой области этих параметров при испытаниях, а также требований технической документации и принятие на этой основе решения о правильности или неправильности функционирования ИС.

В соответствии с системой метрологического обслуживания обнаружение метрологических отказов происходит во время проведения поверок, в процессе которых проводятся измерения значений характеристик по каждому измерительному каналу (ИК).

Чем сложнее и многофункциональнее ИС благодаря добавлению различных ИК, тем более сложной является ее поверка и тем большее значение приобретает достоверность этой поверки и особенно такая составляющая, как вероятность ошибки второго рода. Поэтому при разработке модели функционирования ИС в процессе эксплуатации необходимо учитывать возможность снижения достоверности поверки ИС.

Современные ИС обладают некоторым уровнем избыточности, позволяющим накапливать соответствующее этому уровню количество отказов ИК, не приводящие к отказу ИС в целом. Возвращение утраченного уровня избыточности ИС осуществляется в рамках поверки. Процесс эксплуатации современных ИС, имеющих избыточность, представляется полумарковской моделью, граф которой изображен на рис. 1.

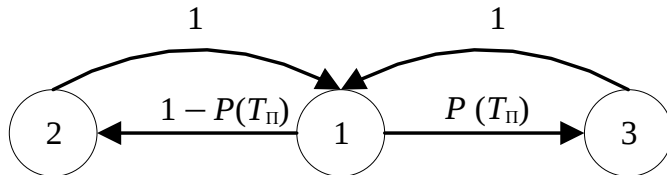


Рис. 1. Граф состояний процесса эксплуатации ИК ИС

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

Вероятность возникновения отказа ИК ИС между поверками будет рассчитываться по формуле

$$P(t \leq T_{\Pi}) = F(T_{\Pi}), \quad (1)$$

где $F(T_{\Pi})$ – функция распределения безотказной работы ИК ИС; T_{Π} – интервал между поверками ИК ИС.

В соответствии с работами [1, 2] полумарковский процесс задается начальным состоянием и двумя матрицами – матрицей переходов вложенной марковской цепи $W, (W = \{w_{ij}\}, (i, j) = \overline{1, r})$ и матрицей условных функций распределения продолжительности пребывания в состояниях $F(t), F(t) = \{F_{ij}(t)\}, (i, j) = \overline{1, r}$.

Для графа, представленного на рис. 1, эти матрицы имеют вид

$$\mathbf{W} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 1-F(T_{\Pi}) & F_{\Pi} \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \quad \mathbf{F}(t) = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & F_{12}(t) & F_{13}(t) \\ \hline F_{21}(t) & 0 & 0 \\ \hline F_{31}(t) & 0 & 0 \\ \hline \end{array}$$

Неравные нулю элементы матрицы $\mathbf{F}(t)$ имеют вид

$$F_{12}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\Pi}; \\ 1, & t \geq T_{\Pi}; \end{cases} \quad F_{13}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ \frac{F(t)}{F(T_{\Pi})}, & 0 < t < T_{\Pi}; \\ 1, & t \geq T_{\Pi}; \end{cases}$$

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

где $T_{\Pi\Pi}$ – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; T_B – математическое ожидание продолжительности восстановления работоспособности ИК ИС; $F(t)$ – функция распределения наработки на отказ ИК ИС.

Стационарное распределение вероятностей состояний полумарковского процесса в соответствии с работой [2] определяется по формуле

$$\pi_i = \frac{P_i m_i}{\sum_{j=1}^3 P_j m_j}, (i, j) = \overline{1, r}, \quad (2)$$

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

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

$$\begin{cases} P_1 w_{11} + P_2 w_{21} + P_3 w_{31} = P_1; \\ P_1 w_{12} + P_2 w_{22} + P_3 w_{32} = P_2; \\ P_1 w_{13} + P_2 w_{23} + P_3 w_{33} = P_3; \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Решение этой системы уравнений имеет вид

$$P_1 = \frac{1}{2}; P_2 = \frac{1-F(T_{\Pi})}{2}; P_3 = \frac{F(T_{\Pi})}{2}.$$

Указанные выше математические ожидания пребывания в состояниях определяются по традиционной формуле [2]

$$m_i = \int_0^{\infty} [1 - F_i(t)] dt, i = \overline{1, r}. \quad (4)$$

Здесь $F_i(t)$ – безусловные функции распределения вероятностей ухода процесса из соответствующих состояний, отыскиваемые в соответствии с работой [2] по формуле

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

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

$$F_1(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ F(t) & 0 < t < T_{\Pi} \\ 1, & t \geq T_{\Pi} \end{cases}, \quad F_2(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\Pi\Pi} \\ 1, & t \geq T_{\Pi\Pi} \end{cases}, \quad F_3(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\Pi\Pi} + T_B \\ 1, & t \geq T_{\Pi\Pi} + T_B \end{cases}. \quad (5)$$

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

$$m_1 = \int_0^{\infty} [1 - F_1(t)] dt = \int_0^{T_{\Pi}} [1 - F(t)] dt = T_{\Pi} - \int_0^{T_{\Pi}} F(t) dt; \quad m_2 = T_{\Pi\Pi}; \quad m_3 = T_{\Pi\Pi} + T_B, \quad (6)$$

где T_{Π} – интервал между поверками ИК ИС; $T_{\Pi\Pi}$ – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; T_B – математическое ожидание продолжительности восстановления работоспособности ИК ИС.

Таким образом, показателем π_1 результативности функционирования ИК ИС в процессе эксплуатации будет вероятность застать полумарковский процесс и, следовательно, объект исследования в исправном состоянии R_1 в произвольный момент времени, т.е.

$$\pi_1 = \frac{T_{\Pi} - \int_0^{T_{\Pi}} F(t) dt}{T_{\Pi} + T_{\Pi\Pi} - \int_0^{T_{\Pi}} F(t) dt + F(T_{\Pi})T_B}. \quad (7)$$

Представленное выражение является аналогом коэффициента готовности, приведенного в ГОСТ Р 27.102–2021. Как видно из формулы (7), приведенная модель учитывает величину интервала между поверками T_{Π} , математическое ожидание продолжительности поверки $T_{\Pi\Pi}$ и продолжительность восстановления T_B . Недостатком модели является отсутствие учета достоверности проводимой поверки ИК ИС.

Исследованиям процессов эксплуатации сложных технических систем (СТС) посвящены работы профессоров Ю. К. Беляева, А. Д. Соловьева, Е. Ю. Барзиловича, В. А. Каштанова, Б. П. Харламова, Л. И. Волкова, Е. И. Сычева, В. И. Мищенко [3–7].

Среди них по совокупности учитываемых факторов выделяются именно полумарковские модели профессоров Л. И. Волкова, Е. И. Сычева и В. И. Мищенко [3–5].

В работе [3] профессора Л. И. Волкова была разработана полумарковская модель процесса эксплуатации сложных технических систем. Применительно к ИК ИС граф состояний модели функционирования ИК ИС включает пять состояний: R_1 – работоспособное состояние ИК ИС; R_2 – периодические проверки работоспособного состояния ИК ИС; R_3 – ИК ИС восстанавливается после возникновения отказов и ложных отказов, а также после скрытого отказа; R_4 – ИК ИС неработоспособен (скрытый отказ); R_5 – периодические проверки ИК ИС со скрытым отказом.

Граф состояний процесса эксплуатации представлен на рис. 2.

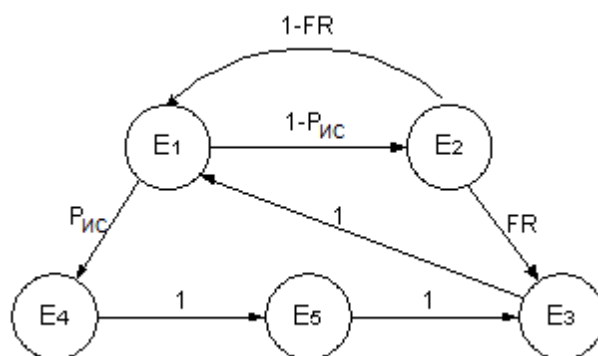


Рис. 2. Граф состояний процесса эксплуатации модели ИК ИС профессора Л. И. Волкова

На рис. 2 обозначены $P_{ИС}$ – вероятность возникновения отказа ИК ИС; F – вероятность ложной регистрации отказа ИК ИС; R – вероятность возникновения отказа в ходе проверки.

В соответствии с выражениями (2)–(7) полумарковская финальная вероятность нахождения ИК ИС в работоспособном состоянии будет иметь следующий вид:

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\omega_4}(1 - e^{-\omega_4 T_{\Pi}})}{T_{\Pi} + T_{\text{III}} + \frac{2}{\omega_1} - e^{-\omega_4 T_{\Pi}} \left[\frac{2(e^{-(\omega_2 + \omega_3)} + T_{\text{III}} - (1 - e^{-(\omega_2 + \omega_3)T_{\text{III}}})}{\omega_1} - \frac{1}{\omega_2 + \omega_3} \right]},$$

где ω_1 – параметр потока восстановлений; ω_2 – параметр потока отказов; ω_3 – параметр потока ложных отказов; ω_4 – параметр потока скрытых отказов; T_{Π} – интервал между поверками ИК ИС; T_{III} – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС.

В работе профессора Е. И. Сычева [4] представлена полумарковская модель процесса эксплуатации ИК ИС, граф которой включает шесть состояний: R_1 – работоспособное состояние ИК ИС; R_2 – отказ ИК ИС; R_3 – проверка отказавшего ИК ИС; R_4 – ИК ИС восстанавливается; R_5 – проверка работоспособного состояния ИК ИС; R_6 – необнаруженный отказ ИК ИС.

Граф изменения состояний ИК ИС в ходе эксплуатации представлен на рис. 3, где D – условная вероятность обнаружения отказа в ИК ИС, когда тот действительно отказал; F – условная вероятность ложного обнаружения отказа ИК ИС, когда тот исправен.

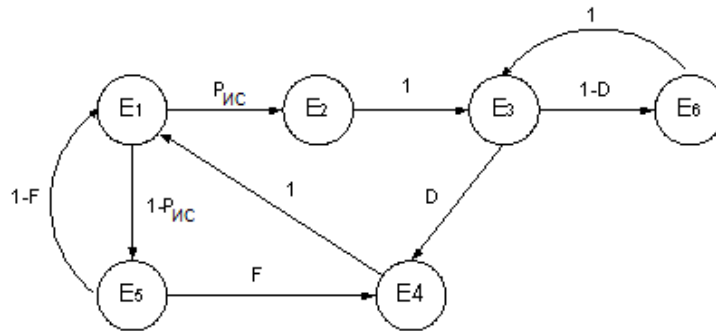


Рис. 3. Граф состояний процесса эксплуатации модели ИК ИС профессора Е. И. Сычева

В соответствии с выражениями (2)–(7) финальная вероятность заставить объект в исправном состоянии примет вид

$$\pi_1 = \frac{1 - \exp(-\lambda T_{\Pi})}{\left[\frac{\lambda T_{\Pi}}{D} + \exp(-\lambda T_{\Pi}) \right] [1 - \exp(-\lambda T_{\Pi})] + \lambda T_{\text{III}}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1 - \exp(-\lambda T_{\Pi})}{\left[\frac{1 - \exp(-\lambda T_{\Pi})}{D} (1 - D) + 1 \right] [1 - \exp(-\lambda T_{\Pi}) (1 - F)] \lambda T_{\text{B}}},$$

где D – вероятность обнаружения отказа; F – вероятность ложной регистрации отказа; λ – интенсивность отказов; T_{Π} – интервал между поверками ИК ИС; T_{III} – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; T_{B} – периодичность восстановления.

Применение модели профессора Л. И. Волкова имеет ряд ограничений, связанных с использованием понятия «скрытый отказ» и, соответственно, параметра скрытых отказов. Если отказ скрытый, то он не может быть обнаружен, и данный факт приводит к невозможности сбора и анализа статистики по таким отказам, которая необходима для расчета параметра скрытых отказов.

Для модели профессора Е. И. Сычева существует ограничение, обусловленное предположением об идентичности восстановления системы после ложной регистрации отказа и действительного обнаружения отказа.

В полумарковской модели процесса функционирования сложной технической системы профессора В. И. Мищенко [5] вышеуказанные ограничения отсутствуют. В этой модели насчитывается семь состояний $R = \{1, 2, \dots, r\}$, ($r = 7$).

Рассматривая данную модель процесса функционирования применительно для ИК ИС получается: R_1 – ИК ИС пригоден и используется по назначению (исходное состояние полумарковского процесса); R_2 – ИК ИС непригоден и функционирует с неисправностью, обусловившей непригодность, до начала контроля технического состояния; R_3 – ИК ИС проверяется при условии, что он к началу проведения контроля технического состояния был исправен; R_4 – ИК ИС проверяется при условии, что он к началу контроля технического состояния был неисправен; R_5 – ИК ИС проходит дополнительную проверку при условии ложной регистрации неисправности; R_6 – ИК ИС используется по назначению с неисправностью до очередного контроля технического состояния; R_7 – ИК ИС проходит дополнительную проверку, подтверждающую ее неисправность, и восстанавливается.

Описанный процесс функционирования формализуется полумарковской моделью, граф которой изображен на рис. 4.

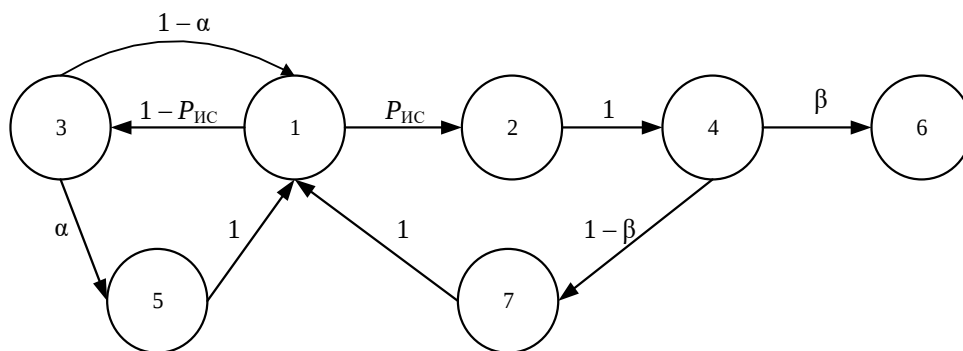


Рис. 4. Размеченный граф полумарковской модели ИК ИС профессора В. И. Мищенко

Матрица переходных вероятностей вложенной марковской цепи $\mathbf{W}$ имеет вид

$$\mathbf{W} = \begin{vmatrix} 0 & P_{ис} & 1-P_{ис} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 1-\beta \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

В соответствии с выражениями (2)–(7) финальная вероятность заставить объект в исправном состоянии примет вид

$$\pi_1 = \frac{\frac{1}{\lambda_{ис}}(1 - \exp(-\lambda_{ис}T_{п}))}{(T_{п} + T_{пп})\left(1 - \exp(-\lambda_{ис}T_{п}) + \frac{1 - \exp(-\lambda_{ис}T_{п})}{1 - \beta}\right) + \alpha T_{дп} \exp(-\lambda_{ис}T_{п}) + (1 - \exp(-\lambda_{ис}T_{п}))T_{в}} = K_{г},$$

λ – интенсивность отказов; $T_{п}$ – интервал между поверками ИК ИС; $T_{пп}$ – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; $T_{в}$ – периодичность восстановления.

В соответствии с данной моделью π_1 является аналогом коэффициента готовности. И этот коэффициент явно зависит от интенсивности метрологических отказов, интервала между поверками, продолжительности поверки, ошибок первого и второго родов, продолжительности диагностирования, а также продолжительности восстановления.

В приведенных моделях профессоров Е. И. Сычева и В. И. Мищенко финальная вероятность заставить объект в исправном состоянии (коэффициент готовности) рассчитана с учетом полной информации о надежности исследуемого объекта и по известному закону распределения – экспоненциальному. Следовательно, необходимо провести доработку данных моделей с учетом ограниченной информации о надежности.

С учетом функции распределения безотказной работы ИК ИС в полумарковской модели процесса функционирования ИК ИС профессора В. И. Мищенко вероятность заставить ИК ИС в исправном состоянии имеет вид

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{\int_0^{T_{II}} tdF(t)}{(T_{II} + T_{III}) \left(1 - F(T_{II}) + \frac{F(T_{II})}{1-\beta} \right) + (1 - F(T_{II}))T_{дп}\alpha + F(T_{II})T_B} = \\ &= \frac{\int_0^{T_{II}} tdF(t)}{T_{II} + T_{III} - F(T_{II})T_{II} - F(T_{II})T_{III} + \frac{T_{II}}{1-\beta} F(T_{II}) + \frac{T_{III}}{1-\beta} F(T_{II}) + T_{дп}\alpha - F(T_{II})T_{дп}\alpha + F(T_{II})T_B} = \\ &= \frac{\int_0^{T_{II}} tdF(t)}{T_{II} + T_{III} + T_{дп}\alpha - F(T_{II}) \left(T_{II} + T_{III} - \frac{T_{II} + T_{III}}{1-\beta} + T_{дп}\alpha - T_B \right)}. \end{aligned}$$

Так как $\int_0^{T_{II}} tdF(t) = \int_0^{T_{II}} tf(t)dt$ и $F(T_{II}) = \int_0^{T_{II}} f(t)dt$, то в соответствии с выражениями (2)–(7)

финальная вероятность заставить ИК ИС в исправном состоянии соответствует выражению

$$\pi_1 = \frac{\int_0^{T_{II}} tf(t)dt}{T_{II} + T_{III} + \alpha T_{дп} - \int_0^{T_{II}} f(t)dt \left(T_{II} + T_{III} - \frac{T_{II} + T_{III}}{1-\beta} + T_{дп}\alpha - T_B \right)}, \quad (8)$$

где T_{II} – интервал между поверками ИК ИС; T_{III} – математическое ожидание продолжительности поверки ИК ИС; T_B – математическое ожидание продолжительности восстановления работоспособности ИК ИС; $T_{дп}$ – продолжительность повторной проверки в случае ошибки 1-го рода; α, β – вероятности возникновения ошибок контроля I и II рода; $f(t)$ – плотность распределения метрологических отказов ИК ИС.

Приведенная модель профессора В. И. Мищенко так же, как и предыдущая, учитывает достоверность контроля. Вместе с тем процесс восстановления ИК ИС представлен более адекватно, а в случае обнаружения ложного отказа проводится дополнительная перепроверка по отказавшему параметру, что позволяет продолжить использование ИК ИС по назначению. Если же отказ подтверждается, то осуществляется восстановление, а затем ИК ИС возвращается в режим нормального функционирования. Но для данной модели, как и для всех предыдущих рассмотренных моделей, существует ограничение, предполагающее наличие полной информации о надежности исследуемого объекта и известной функции распределения безотказной работы.

Таким образом, с учетом имеющихся положительных сторон модели профессора В. И. Мищенко и доработкой ее в плане учета особенностей функционирования ИК ИС при неизвестной функции распределения безотказной работы (8) данная модель является наиболее приемлемой из рассмотренных выше моделей.

Также суть модели, предложенной профессором В. И. Мищенко, заключается в том, что финальная вероятность заставить ИК ИС в исправном состоянии зависит от плотности распределения метрологических отказов ИК ИС. И в свою очередь данная модель может быть использована для обоснования параметров стратегии метрологического обслуживания [6] при ограниченной информации о надежности на этапе проектирования.

Одной из особенностей этапа проектирования является то, что плотность распределения метрологических отказов ИК ИС неизвестна, а получаемая статистическая информация оказывается достаточной для определения оценок моментов распределения отказов (математического ожидания и дисперсии).

Для решения данной задачи при имеющейся информации об оценках моментов необходимо применить аппарат континуального линейного программирования (КЛП), который позволит определить плотность распределения метрологических отказов. Теория и математические методы для решения задач аппаратом КЛП хорошо отработаны и находят широкое применение в работе [7]. При этом аппарат КЛП предусматривает нахождение такой плотности распределения метрологических отказов ИК ИС, которая минимизирует коэффициент готовности. Такой подход обеспечивает обоснование параметров стратегии метрологического обслуживания при гарантированной величине коэффициента готовности.

Проанализировав вышеизложенные модели и их особенности, можно прийти к выводу, что использование модели профессора В. И. Мищенко с учетом аппарата КЛП является одним из перспективных направлений обоснования стратегии метрологического обслуживания ИК ИС при ограниченной информации о надежности.

Заключение

В данной статье представлен анализ моделей эксплуатации сложных технических систем, применение которых позволяет комплексно учесть влияние на надежность различных факторов: периодичности контроля, интенсивности использования по назначению, вероятности возникновения неисправности, продолжительности проведения контроля, вероятности возникновения ошибок I и II рода. Определено, что для описания процесса функционирования ИС как сложной системы наиболее приемлемой является теория полумарковских процессов. При этом наиболее приемлемой из рассмотренных выше моделей является модель профессора В. И. Мищенко, но для использования данной модели необходимо провести расчет плотности распределения метрологических отказов ИК ИС с применением аппарата КЛП на основании оценок математического ожидания и дисперсии распределения метрологических отказов для каждого ИК ИС.

Список литературы

1. Ефремов В. А., Мищенко В. И., Мищенко И. В. Полумарковская модель процесса функционирования средств измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 29–38. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-3
2. Харламов Б. П. Непрерывные полумарковские процессы. СПб. : Наука, 2001. 431 с.
3. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М. : Высш. шк., 1981. 368 с.
4. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : Татьяна день, 1993. 274 с.
5. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника-сервис, 2016. 218 с.
6. Ефремов В. А., Мищенко В. И., Гончаров А. П., Ткаченко П. А. Методика обоснования стратегии технического обслуживания мобильного метрологического комплекса на базе одномерной многоярусной полумарковской модели // Вестник метролога. 2023. № 2. С. 12–17.
7. Раскин Л. Г., Кириченко И. О. Континуальное линейное программирование. Харьков : Военный институт ВВ МВС, 2005. 176 с.

References

1. Efremov V.A., Mishchenko V.I., Mishchenko I.V. The Semimarkov model of the process of functioning of measuring instruments. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):29–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-3
2. Kharlamov B.P. *Nepreryvnye polumarkovskie protsessy = Continuous semi-markov processes*. Saint Petersburg: Nauka, 2001:431. (In Russ.)
3. Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiey letatel'nykh kompleksov = Management of the operation of aircraft complexes*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:368. (In Russ.)
4. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury = Metrological support of radio electronic equipment*. Moscow: Tat'yanin den', 1993:274. (In Russ.)
5. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh system = Problematics of operation of complex technical systems*. Saint Petersburg: Politekhniko-servis, 2016:218. (In Russ.)
6. Efremov V.A., Mishchenko V.I., Goncharov A.P., Tkachenko P.A. Methodology for substantiating the strategy of maintenance of a mobile metrological complex based on a one-dimensional multi-tiered semi-Markov model. *Vestnik metrologa = Bulletin of the Metrologist*. 2023;(2):12–17. (In Russ.)
7. Raskin L.G., Kirichenko I.O. *Kontinual'noe lineynoe programmirovaniye = Continuous linear programming*. Kharkov: Voennoy institut VV MVS, 2005:176. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Сергей Сергеевич Верхушин**

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

Sergey S. Verkhushin

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

Владимир Ильич Мищенко

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

Vladimir I. Mishchenko

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

Илья Владимирович Мищенко

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

Ilya V. Mishchenko

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

Кирилл Николаевич Исаков

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

Kirill N. Isakov

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

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

Поступила в редакцию/Received 11.07.2024

Поступила после рецензирования/Revised 05.08.2024

Принята к публикации/Accepted 02.09.2024

УДК 389.14

doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Е. А. Михайлов¹, В. И. Мищенко², А. П. Пермяков³

^{1,2,3} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

^{1,2,3} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проведен анализ работ, посвященных изучению существующих подходов к обоснованию срока службы сложных технических систем. *Материалы и методы.* Проведено обоснование, что одним из перспективных направлений моделирования процессов функционирования сложных технических систем являются теории полумарковских процессов, позволяющие учесть все многообразие вероятностных процессов сопровождающих эксплуатацию метрологических комплексов. Определено, что характеристика подходов к функционированию метрологических комплексов на протяжении жизненного цикла должна базироваться на выборе требуемого срока службы. Предложен процесс определения требуемого срока службы метрологических комплексов путем выбора оптимальных параметров стратегии метрологического обслуживания. *Результаты и выводы.* Применение данной стратегии позволит увеличить срок службы метрологических комплексов.

Ключевые слова: метрологические комплексы, срок службы, стратегия метрологического обслуживания, полумарковский процесс

Для цитирования: Михайлов Е. А., Мищенко В. И., Пермяков А. П. Анализ существующих подходов к обоснованию срока службы метрологических комплексов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 40–45. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5

ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO SUBSTANTIATING THE SERVICE LIFE OF METROLOGICAL COMPLEXES

E.A. Mikhaylov¹, V.I. Mishchenko², A.P. Permyakov³

^{1,2,3} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

^{1,2,3} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* The article analyzes the works devoted to existing approaches to substantiating the service life of complex technical systems. *Materials and methods.* The substantiation is carried out that one of the promising areas of modeling the processes of functioning of complex technical systems are the theories of semi-Markov processes, which allow taking into account all the variety of probabilistic processes accompanying the operation of metrological complexes. It is determined that the characteristic of approaches to the functioning of metrological complexes throughout the life cycle should be based on the choice of the required service life. The process of determining the required service life of the metrological complexes is proposed by selecting the optimal parameters of the metrological maintenance strategy. *Results and conclusions.* The application of this strategy will increase the service life of metrological complexes.

Keywords: metrological complexes, service life, strategy of metrological maintenance, semi-Markov process

For citation: Mikhaylov E.A., Mishchenko V.I., Permyakov A.P. Analysis of existing approaches to substantiating the service life of metrological complexes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):40–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5

Введение

Специфика метрологической службы Вооруженных Сил Российской Федерации состоит в том, что она должна обеспечить поверку средств измерений из состава вооружения, военной и специальной техники (далее – ВВСТ). Это обуславливает необходимость наличия метрологических комплексов (далее – МК), которые должны служить столько, чтобы в рациональные сроки осуществить своевременное обслуживания ВВСТ. На стадии проектирования конструкторы

нормируют значения сроков службы МК в технических заданиях и технических условиях. При этом если долговечность МК будет значительно завышена по сравнению с тем сроком, в течение которого они будут использоваться, то это повлечет за собой уменьшение возможностей МК по поверке средств измерений. Исходя из сроков службы МК определяются нормы амортизационных отчислений, обеспечивающие их воспроизводство, а органы материально-технического обеспечения рассчитывают потребность в МК и необходимость его своевременной замены. Инженерно-техническая служба, эксплуатирующая МК, обосновывает потребность в ремонте машин и оборудования в течение всего срока использования, определяет необходимый объем ремонтных работ, рассчитывает потребность в запасных частях, обменном фонде составных частей комплекса, необходимой ремонтно-обслуживающей базе.

Существующие в настоящее время нормативные сроки службы МК в большинстве случаев не имеют под собой серьезного технического обоснования и являются отражением давно установленных в законодательном порядке обобщенных норм амортизационных отчислений на полное восстановление оборудования. Поэтому они могут и должны рассматриваться как граничный срок, при достижении которого должна быть объективно оценена возможность дальнейшей эксплуатации МК.

Фактическое техническое состояние МК и допустимые сроки их дальнейшего использования определяются условиями ее эксплуатации, периодичностью и качеством проведения ремонтов и технических обслуживаний и т.д. Перечисленные факторы являются индивидуальными, и их влияние на фактическое техническое состояние может быть оценено только на базе обследования каждого конкретного МК. Поэтому работы по обоснованию сроков эксплуатации должны предусматривать всестороннее, в том числе и инструментальными методами, определение условий эксплуатации каждого типа МК и их фактическое техническое состояние для выработки и осуществления мероприятий, в том числе и модернизации отдельных узлов, направленных на повышение эффективности дальнейшего использования МК. В процессе такой модернизации должна происходить замена изношенных и устаревших составных частей на новые, обеспечивающие повышение надежности и ремонтпригодности оборудования, улучшения систем управления, диагностики и др. [1].

Расхождение значений фактических и нормативных сроков службы вносит диспропорцию в организацию технического обслуживания. В этой связи обоснование сроков службы МК на основании исследования соотношения нормативных и фактических их сроков использования является актуальной проблемой.

Для МК отсутствует прямая связь сроков службы с годовой наработкой. Чаще всего применяют два показателя: амортизационный и фактический срок службы. Первый характеризует период полного переноса стоимости оборудования на производственную деятельность, а второй – время действительного его функционирования.

Анализ МК позволил установить, что значительное их количество, находящихся в эксплуатации, исчерпало свой нормативный срок службы. Действительные или фактические сроки службы превышают амортизационные сроки. Диспропорция сроков службы обусловлена спецификой эксплуатации МК, которое представляет собой восстанавливаемые объекты длительного применения. Текущие ремонты его проводят на месте эксплуатации заменой отказавших элементов запасными частями или агрегатами и узлами обменного фонда. Практика подтверждает отсутствие прямой связи его календарного срока службы с наработкой [2].

Анализ существующих подходов к обоснованию срока службы метрологических комплексов

Анализ существующих методов оценки и прогнозирования технического состояния, показателей надежности и остаточного ресурса для обоснования и продления срока службы МК показал, что решение этой научной задачи базируется на использовании следующих методов:

- методы, основанные на ускоренных испытаниях;
- методы, основанные на выявлении статистических закономерностей изменения определяющих параметров;
- метод индивидуального прогнозирования долговечности на основе статистической классификации;
- метод экстраполяции значений показателей эксплуатационной надежности.

Методы ускоренных испытаний основаны на форсировании режимов испытаний элементной базы радиоэлектронных средств относительно эксплуатационных путем ужесточения электрических режимов питания и нагрузки, ужесточения факторов окружающей среды, повышения интенсивности их работы (увеличение числа включений, сокращение времени простоев и т.п.).

Форсированные испытания в общем случае включают два этапа:

- предварительные испытания с целью выбора форсированного режима, оценки коэффициента ускорений испытаний и определения длительности испытаний;
- собственно, испытания исследуемых элементов в форсированном режиме.

При обосновании возможности продления срока службы элементов МК традиционно используются два подхода:

- производится статистическая оценка вероятности безотказной работы на требуемое время продления по результатам форсированных испытаний;
- осуществляется прогноз технического состояния элементов МК.

За счет проведения испытаний в форсированном режиме имитируются условия эксплуатации МК до достижения требуемой наработки или календарного срока. Затем осуществляется оценка технического состояния элементов МК и выработка решения на продление срока службы в соответствии с существующей методикой. Преимущество данной методики состоит в том, что она может быть использована при неизменных значениях технических параметров (отсутствии отказов).

Для применения метода ускоренных испытаний на долговечность в форсированном режиме необходимо иметь три выборки (две для предварительных испытаний), объем которых определяется в соответствии с выбранным процентом годных элементов МК и числом отказов. В качестве параметров форсирующих режимов выбираются повышенная температура и циклические включение и выключение источников питания.

Сложностью применения методов, основанных на ускоренных испытаниях для МК, является необходимость наличия представительных выборок по отказам МК, а также отсутствие модели отказов [3].

Методы, основанные на выявлении статистических закономерностей изменения определяющих параметров. Эти методы основаны на выявлении статистических закономерностей изменения определяющих параметров МК во времени с учетом условий и режимов эксплуатации, построении соответствующих математических моделей и прогнозировании на их основе моментов достижения параметрами границы поля допуска.

Выявление указанных закономерностей осуществляется по результатам наблюдения в течение некоторого периода времени за исследуемым МК при его эксплуатации (хранении), а также по данным испытаний выборки демонтированных изделий или их аналогов в условиях и режимах, имитирующих реальную эксплуатацию.

Рассмотрим метод прогнозирования показателей долговечности МК по запасу параметрической надежности.

Суть метода состоит в том, что партию изделий делят на несколько выборок с различными значениями определяющего технического параметра и определяют для них коэффициент, характеризующий запас параметрической надежности. Для каждой выборки (каждого значения коэффициента) вычисляют нижнюю границу срока службы. По полученным значениям строят зависимость и по данной зависимости определяют соответствующий остаточный срок службы.

Рассмотренный метод приемлем только для элементов МК, а не для образца в целом, и на исследование определяющих параметров необходим значительный период времени.

Метод индивидуального прогнозирования долговечности МК на основе статистической классификации изделий базируется на теории распознавания образов, в рамках которой предполагается наличие вероятностной связи между техническими параметрами изделия и его наработкой до отказа.

Метод прогнозирования включает две основные процедуры:

- обучения, при которой на основе накопленной ранее статистической информации, полученной по результатам эксплуатации или испытаний однотипных МК в сходных условиях и режимах, составляются описания классов изделий, отличающихся различной долговечностью;
- распознавания, при которой определяется принадлежность предъявляемого для прогнозирования изделия к одному из классов по долговечности.

Сложность применения данного метода заключается в необходимости обеспечения представительных выборок по отказам, позволяющих описать классы изделий, различающиеся по сроку службы. Данный метод применим только для изделий единичного применения.

Метод экстраполяции значений показателей эксплуатационной надежности состоит в выявлении тенденции изменения этих показателей группы однотипных МК в аппаратуре, аппроксимации изменений подходящими аналитическими функциями и использовании последних для прогнозирования показателей надежности на требуемый срок.

Решение на продление вырабатывается по результатам сопоставления прогнозируемых значений показателей с предельно допустимыми, которые устанавливаются в техническом задании на продление.

В качестве прогнозируемых показателей надежности рекомендуется использовать значение параметра потока отказов группы однотипных МК или значение интенсивности отказов.

Для реализации метода необходимо располагать следующей исходной информацией:

- при прогнозировании параметра потока отказов – текущими моментами возникновения отказов МК с указанием наработки аппаратуры;
- при прогнозировании интенсивности отказов МК – наработкой отказавших и не отказавших МК.

Достоинством метода в отличие от предыдущих является наличие модели отказов. Но для реализации данного метода необходим достаточный объем статистических данных для расчета моментов распределения наработки на отказ.

Еще одним подходом к обоснованию величины срока службы является моделирование процесса функционирования МК в течение всего жизненного цикла. Среди известных работ на эту тему перспективными являются работы профессоров В. И. Мищенко, Е. И. Сычева и Л. И. Волкова [4–6], базирующиеся на использовании теории полумарковских моделей. Но и в этих работах описывается не весь жизненный цикл, а только некоторая функция между соседними техническими обслуживаниями. При этом предполагается, что объект обслуживания после проведения обслуживания полностью восстанавливает свой ресурс. Кроме этого, в названных работах отсутствует учет интенсивности эксплуатации. А именно этот фактор является одним из основных, определяющих конечное значение срока службы.

В качестве направления моделирования процесса функционирования МК на протяжении жизненного цикла следует использовать подход, учитывающий интенсивность эксплуатации.

Наиболее перспективным подходом к функционированию МК на протяжении жизненного цикла является использование теории полумарковских процессов, позволяющих учесть все многообразие вероятностных процессов, сопровождающих эксплуатацию МК [7].

Характеристика подходов к функционированию МК на протяжении жизненного цикла должна базироваться на выборе требуемого срока службы в результате решения оптимизационной задачи максимизации комплексного коэффициента готовности как функции основных параметров стратегии метрологического обслуживания и срока службы:

$$T_{\text{сл}}^{\text{оптим}} = \arg \max_{X(N), T_{\text{имп}}(N), T_{\text{имп}}} K_{\Gamma}(P_{\text{МК}}, P_{\text{пэ}}, T_{\text{имп}}, T_{\text{имп}}(N), X(N), T_{\text{п}}, \alpha, \beta, T_{\text{в}}, K_{\text{и}}, T_{\text{сл}}),$$

где $P_{\text{МК}}$ – вероятность возникновения метрологических отказов МК (с учетом возмущающих воздействий и деструктивных факторов); $P_{\text{пэ}}$ – вероятность возникновения неисправности первичного эталона; $T_{\text{имп}}$ – периодичность метрологического обслуживания МК; $X(N)$ – матрица распределений РЭ по видам метрологического обслуживания; $T_{\text{имп}}(N)$ – количество видов метрологических обслуживаний; $T_{\text{п}}$ – продолжительность проведения поверки РЭ; α, β – вероятности возникновения ошибок контроля I и II рода; $T_{\text{в}}$ – средняя продолжительность восстановления МК; $K_{\text{и}}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации МК; $T_{\text{сл}}$ – назначенный срок службы МК.

Процесс определения требуемого срока службы МК достигается путем выбора оптимального значения количества видов метрологических обслуживаний и матрицы распределения рабочих эталонов по видам метрологических обслуживаний.

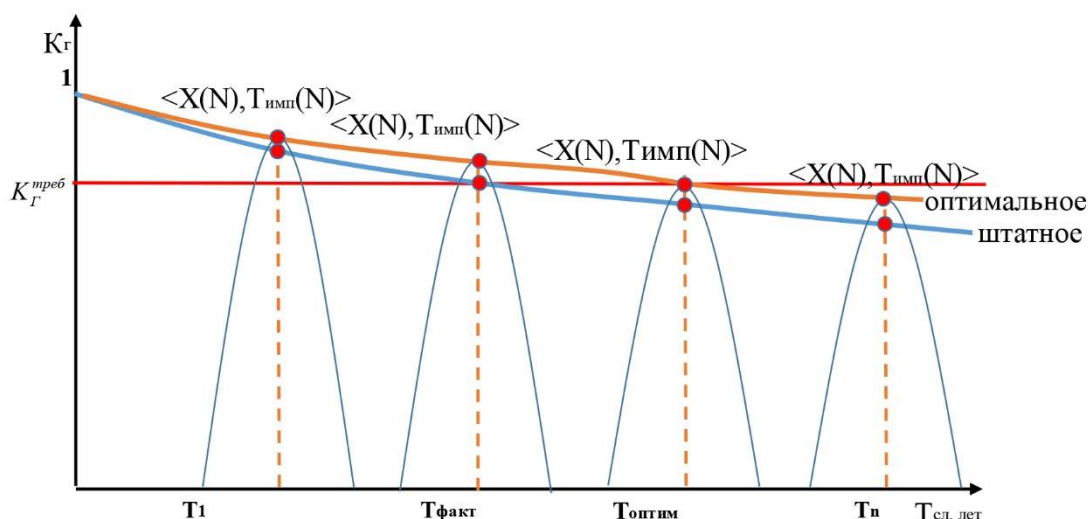


Рис. 1. Определение оптимального срока службы метрологического комплекса

На рис. 1 представлена зависимость срока службы МК (оптимальное и штатное значение) от коэффициента готовности. Для каждой выборки (каждого значения коэффициента готовности) вычисляют нижнюю границу срока службы. При проведении штатных метрологических обслуживаний значение коэффициента готовности примет значению срока службы $T_{\text{факт}}$, а при проведении оптимальной стратегии метрологического обслуживания значения коэффициента готовности примет значение срока службы $T_{\text{оптим}}$. Проведение оптимальной стратегии метрологического обслуживания позволит увеличить ресурс и эффективность работы МК.

Заключение

В данной статье представлен анализ подходов к обоснованию срока службы сложных технических систем. Определено, что для описания процесса функционирования МК как сложной системы наиболее приемлемой является теория полумарковских процессов. В процессе функционирования МК необходимо выбрать такую оптимальную стратегию метрологического обслуживания, которая позволит увеличить срок службы и повысить эффективность их работы.

Таким образом, одним из принципов, обеспечивающих увеличение сроков службы МК, является обязательность их пересмотра в условиях технического перевооружения. Увеличение сроков службы оборудования способствует экономии материальных средств и рациональному использованию инвестиций в вооруженных силах.

Список литературы

1. Мищенко В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника сервис, 2016. 218 с.
2. Шуенкин В. А., Донченко В. С. Прикладные модели теории массового обслуживания. Киев : НМК ВО, 1992. 398 с.
3. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : Татьяна день, 1993. 274 с.
4. Мищенко, В. И., Храмов М. Ю. Проблематика эксплуатации сложных технических систем. СПб. : Политехника-сервис, 2016. 218 с.
5. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. М. : Татьяна день, 1993. 274 с.
6. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М. : Высш. шк., 1981. 368 с.
7. Мищенко В. И., Кравцов А. Н., Мамлеев Т. Ф. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учетом периодичности поверки // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 22–27.

References

1. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh system = Problematics of operation of complex technical systems*. Saint Petersburg: Politekhnik servis, 2016:218. (In Russ.)

2. Shuenkin V.A., Donchenko V.S. *Prikladnye modeli teorii massovogo obsluzhivaniya = Applied models of queuing theory*. Kiev: NMK VO, 1992:398. (In Russ.)
3. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury = Metrological support of radio electronic equipment*. Moscow: Tat'yanin den', 1993:274. (In Russ.)
4. Mishchenko V.I., Khramov M.Yu. *Problematika ekspluatatsii slozhnykh tekhnicheskikh system = Problematics of operation of complex technical systems*. Saint Petersburg: Politehnika-servis, 2016:218. (In Russ.)
5. Sychev E.I. *Metrologicheskoe obespechenie radioelektronnoy apparatury = Metrological support of radio electronic equipment*. Moscow: Tat'yanin den', 1993:274. (In Russ.)
6. Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiei letatel'nykh kompleksov = Management of the operation of aircraft complexes*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:368. (In Russ.)
7. Mishchenko V.I., Kravtsov A.N., Mamleev T.F. A semi-Markov model of the functioning of redundant measuring instruments, taking into account the frequency of verification. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2021;(4):22–27. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Александрович Михайлов

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

Evgeny A. Michaylov

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

Владимир Ильич Мищенко

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

Vladimir I. Mishchenko

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

Александр Петрович Пермяков

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

Aleksandr P. Permyakov

Engineer of the control and measuring laboratory,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 11.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 07.08.2024

Принята к публикации / Accepted 03.09.2024

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

П. Г. Михайлов¹, А. П. Михайлов², И. Н. Пасхин³, А. Р. Ахметов⁴, Е. Д. Фадеев⁵

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

² ООО «Газпромнефть–Цифровые решения», Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО НПЦ «КИТ», Пенза, Россия

¹ pit_mix@mail.ru, ² krendeleshik@gmail.com, ³ lluha1.1000@mail.ru, ⁴ icmus@mail.ru, ⁵ mercenfry@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается разработка конструктивно-технологических методов обеспечения временной и параметрической стабильности пленок и пленочных структур, формируемых на металлопленочных датчиках физических величин. Актуальность изложенных материалов состоит в том, что именно от стабильности резистивных пленок и пленочных структур зависит в большей степени стабильность датчиков. Цель – разработка воспроизводимых конструкций и технологий, обеспечивающих формирование стабильных по времени сенсорных элементов и структур. *Материалы и методы.* Достаточно подробно описаны предлагаемые конструкции полипленочных тензорезистивных структур различной конфигурации. Рассмотрены и проанализированы математические модели многослойных пленочных структур, определены номиналы тензорезисторов и методы их минимизации температурных коэффициентов резистивных структур. *Результаты и выводы.* В результате проведенных исследований в области разработки методов регулирования и поддержания временной и параметрической стабильности характеристик датчиков определены конструкции полипленочных структур и методы их формирования. В частности, было достигнуто повышение точности и постоянства электрофизических характеристик чувствительных элементов и измерительных модулей на 30–40 % по сравнению с известными российскими датчиками.

Ключевые слова: стабильность, пленка, тензорезистор, датчик, давление, температура, чувствительный элемент

Для цитирования: Михайлов П. Г., Михайлов А. П., Пасхин И. Н., Ахметов А. Р., Фадеев Е. Д. Методы обеспечения стабильности пленочных структур металлопленочных датчиков для ракетно-космической и авиационной техники // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 46–57. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-6

METHODS FOR ENSURING THE STABILITY OF FILM STRUCTURES OF METAL-FILM SENSORS FOR ROCKET, SPACE AND AVIATION EQUIPMENT

P.G. Mikhaylov¹, A.P. Mikhaylov², I.N. Paskhin³, A.R. Akhmetov⁴, E.D. Fadeev⁵

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

² GazpromNeft–Digital Solutions LLC, St. Petersburg, Russia

⁴ NPTS KIT LLC, Penza, Russia

¹ pit_mix@mail.ru, ² krendeleshik@gmail.com, ³ lluha1.1000@mail.ru, ⁴ icmus@mail.ru, ⁵ mercenfry@gmail.com

Abstract. *Background.* The article is devoted to the development of constructive and technological methods for ensuring the temporal and parametric stability of films and film structures formed on metal–film sensors of physical quantities. The relevance of the presented materials lies in the fact that the stability of sensors depends to a greater extent on the stability of resistive films and film structures. The purpose of the article is to develop reproducible designs and technologies that ensure the formation of time-stable sensor elements and structures. *Materials and methods.* The article describes in sufficient detail the proposed designs of polyfilm strain-resistant structures of various configurations. Mathematical models of multilayer film structures are considered and analyzed, the nominal values of strain gages are determined, and methods for minimizing the temperature coefficients of resistive structures are determined. *Results and conclusions.* As a result of the research conducted in the field of developing methods for regulating and maintaining the temporal and parametric stability of sensor characteristics, the designs of polyfilm structures and methods of their

formation are determined. In particular, an increase in the accuracy and consistency of the electrophysical characteristics of the sensing elements and measuring modules was achieved by 30–40 % compared with well-known Russian sensors.

Keywords: stability, film, strain gauge, sensor, pressure, temperature, sensing element

For citation: Mikhaylov P.G., Mikhaylov A.P., Pashkin I.N., Akhmetov A.R., Fadeev E.D. Methods for ensuring the stability of film structures of metal-film sensors for rocket, space and aviation equipment. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):46–57. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-6

Общие сведения о стабилизации тонкопленочных резистивных структур в микроэлектронных датчиках

Очень важное значение при изготовлении высокотемпературных металлопленочных датчиков имеет технология напыления тонких пленок из различных металлов и методы стабилизации их электрофизических характеристик (ЭФХ).

Разработанный и применяемый для высокотемпературных датчиков тензорезистивный сплав из группы керметов – П7.5ХС [1], содержащий в своем составе хром, кремний, железо, алюминий, а также добавки редкоземельных элементов и представляющий собой гранулы этого материала, имеет невысокую стабильность по известной и апробированной технологии его напыления. Поэтому целесообразным является создание тонкопленочных резистивных структур, в которых сочетаются свойства известных тензорезистивных материалов, например, сплава Х20Н75Ю и сплава рения с вольфрамом (ВР–27 ВП) или с молибденом (МР–47 ВП). Для этого необходимо исследовать ЭФХ тонкопленочных тензорезисторов (ТР) со структурой резистивного слоя из двух или больших пленок резистивных материалов (РМ):

- с двухслойной структурой;
- с многослойной структурой, содержащей резистивную пленку из взаимно чередующихся монослоев РМ [2];
- с многослойной структурой, содержащей резистивную пленку из взаимно чередующихся монослоев РМ и отдельным слоем из материала с положительным ТКС;
- со сложной композиционной многослойной структурой, содержащей пленку из взаимно чередующихся монослоев двух РМ и отдельных слоев из этих или иных материалов.

Так как сплавы с рением имеют высокую температуру плавления (до 3000 °С), то для получения тонких пленок из этих сплавов необходимо использовать высокоэнергетические методы распыления, такие как электронно-лучевое или магнетронное распыление. Для возможности напыления сплавов Х20Н75Ю и МР–47 ВП в одном вакуумном цикле была модернизирована под магнетронное напыление установка УВН 71-ПЗ, в которой были смонтированы два дополнительных магнетрона с мишенями – катодами из сплавов Х20Н75Ю и МР–47 ВП.

Технологические методы обеспечения стабильности тонкопленочных систем датчиков

Формирование диэлектрических, полупроводниковых и металлических пленок с различным сочетанием легирующих материалов позволяет методика использования магнетронного напыления из одиночных источников, расположенных в напылительной секции магнетрона. В магнетроне монтируются распыляемые материалы различного состава. В частности, пленки со сложным составом, предназначенные для высокостабильных тензорезисторов, состоят из твердых растворов никеля в хроме. Сложные однослойные пленки из указанных материалов сформированы при температуре подложки примерно 200 °С. Тензорезисторы были получены при магнетронном формировании пленки из отдельных источников. При этом основные электрофизические характеристики (ЭФХ) в одиночной пленке в значительной степени отличаются от аналогичных характеристик в многослойной пленке, так, ТКС составлял $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [3, 4].

Регулирование ТКС тензорезисторов обеспечивалось исходя из ранее полученных экспериментальных данных, путем программирования и внесения поправок, включенных в процесс термической обработки и стабилизации. Это позволяет добиться минимизации ТКС и дальнейшего повышения стабильности тензорезисторных металлопленочных датчиков.

Двухслойные тонкопленочные структуры резистивных слоев МЭД

Двухслойная структура резистивного слоя (рис. 1) может формироваться с использованием следующих конструктивно-технологических вариантов: нижний слой – из композиции,

имеющей величину температурного коэффициента сопротивления со знаком минус, а верхний слой – из композиции, имеющей величину температурного коэффициента сопротивления со знаком плюс.

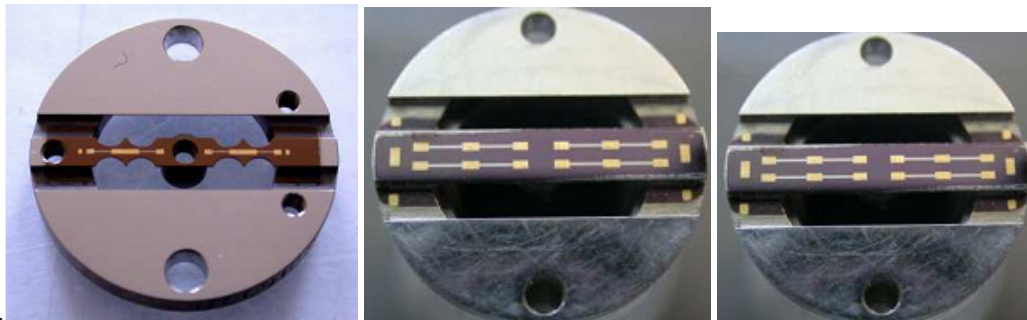


Рис. 1. Двухслойная структура тонкопленочных тензорезисторов

Сопротивление двухслойного резистора можно определить

$$R = \frac{\rho_{s1}\rho_{s2}}{\rho_{s1} + \rho_{s2}} N = \frac{n}{1+n} \rho_{s1} N, \quad (1)$$

где ρ_{s1} – поверхностное сопротивление нижнего слоя; ρ_{s2} – поверхностное сопротивление верхнего слоя; N – число квадратов резистивного слоя; $n = \frac{\rho_{s2}}{\rho_{s1}}$ – соотношение поверхностных сопротивлений формируемых слоев.

Из возможных вариантов формирования двухслойной структуры наиболее рациональным является первый вариант, так как при формировании тонкопленочной структуры по второму варианту слой из материала с отрицательным ТКС необходимо обязательно защищать слоем диэлектрика, что в значительной степени усложняет технологию формирования ЧЭ.

Из выражения (1) величина поверхностного сопротивления R_s двухслойной структуры резистивного слоя определится выражением

$$R_s = \frac{n}{1+n} \rho_{s1} = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \rho_{s1}, \quad (2)$$

где d_1 и d_2 – толщины первого и второго слоев ТР соответственно.

При воздействии температуры сопротивление тонкопленочного ТР с двухслойной структурой резистивного слоя можно представить

$$R(T) \approx \frac{n(1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T)}{(1 + \alpha_1 \Delta T) + n(1 + \alpha_2 \Delta T)}, \quad (3)$$

где α_1 – ТКС нижележащей пленки многослойного покрытия; α_2 – ТКС верхележащей пленки многослойного покрытия; ΔT – диапазон исследуемых температур. После проведения простейших преобразований математическая модель ТКС (α_R) многоуровневого тензорезистора будет выглядеть

$$\alpha_R \approx \frac{n\alpha_1 + \alpha_2}{(1 + \alpha_1 \Delta T) + n(1 + \alpha_2 \Delta T)}. \quad (4)$$

Учитывая, что преобразованная многослойная пленочная композиция тензорезистивного слоя должна обладать значением ТКС (α_R), близкий к нулю, т.е. $\alpha_R \approx 0$, соотношение n из формулы (4):

$$n = \frac{\rho_{s2}}{\rho_{s1}} = \frac{d_1}{d_2} = \left| \frac{\alpha_2}{-\alpha_1} \right|. \quad (5)$$

Это соотношение позволяет определить и технологический маршрут формирования двухслойной структуры:

– напыление нижнего слоя структуры из материала с отрицательным ТКС до достижения величины поверхностного сопротивления ρ_{s1} , рассчитываемого как $\rho_{s1} = R_s \frac{1+n}{n}$;

– напыление верхнего слоя структуры из материала с положительным ТКС до достижения требуемой величины поверхностного сопротивления ρ_s всей структуры, при этом величина поверхностного сопротивления верхнего слоя ρ_{s2} определяется выражением

$$\rho_{s2} = n\rho_{s1}.$$

Многослойные структуры резистивного слоя МЭД

Многослойная тонкопленочная структура резистивного слоя (рис. 2) состоит из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов с противоположными по знаку ТКС (второй основной вариант исполнения).

Такая структура может быть сформирована по двум дополнительным вариантам:

- с нижним монослоем из материала с отрицательным ТКС (первый дополнительный вариант);
- с нижним монослоем из материала с положительным ТКС (второй дополнительный вариант).

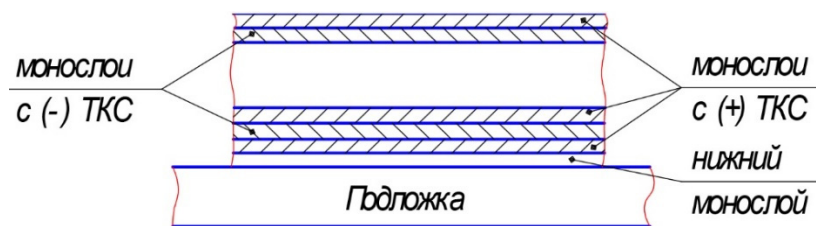


Рис. 2. Многослойная структура резистивного слоя с взаимно чередующимися монослоями из двух резистивных материалов

Общеизвестно, что проводимость металлической пленки проявляется на раннем этапе формирования вследствие туннельного эффекта, когда пленка состоит из отдельных разрозненных островков (участок 1, рис. 3).

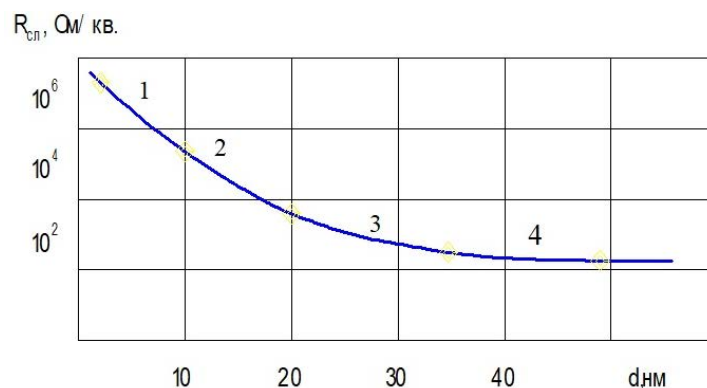


Рис. 3. Зависимость поверхностного сопротивления металлической пленки от толщины:

- 1 – островковая структура; 2 – начало массового соприкосновения островков;
3 – сетчатая структура; 4 – сплошная пленка

Таким образом, при формировании пленки последовательным напылением двух резистивных материалов из двух изолированных источников (мишеней) сопротивление элементарного резистора Δr можно представить выражением

$$\Delta r \approx \frac{\Delta \rho_{s1} \Delta \rho_{s2}}{\Delta \rho_{s1} + \Delta \rho_{s2}} N = \Delta \rho_{s1-2} N, \quad (6)$$

где $\Delta\rho_{S1}$, $\Delta\rho_{S2}$ – приращения поверхностных сопротивлений монослоев, которые формируются за каждый цикл напыления из материалов с отрицательным и положительным ТКС соответственно.

С увеличением используемых циклов напыления m толщина пленки увеличивается, т.е. $d = (\Delta d_1 + \Delta d_2)m$, а величина поверхностного сопротивления уменьшается до требуемого значения R_{cl}

$$R_{cl} = \frac{\Delta\rho_{S1}\Delta\rho_{S2}}{(\Delta\rho_{S1} + \Delta\rho_{S2})m}, \quad (7)$$

где $m = Mt$, M – скорость вращения карусели, об/мин; t – время напыления, мин.

Для учета изменения сопротивления монослоев от температуры ММ:

$$R(T) \approx \frac{(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T)n_1\Delta\rho_{S1}}{m[(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)]} N, \quad (8)$$

где $n_1 = \frac{\Delta\rho_{S2}}{\Delta\rho_{S1}} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{\Delta d_1}{\Delta d_2}$ – соотношение приращений поверхностных сопротивлений наносимых монослоев.

ТКС (α_R) тонкопленочного ТР с многослойной структурой из взаимно чередующихся монослоев можно представить ММ:

$$\alpha_R \approx \frac{\alpha_2 + n_1\alpha_1}{(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)}. \quad (9)$$

Следует отметить, в исследуемой структуре тензорезистивного слоя с чередующимися слоями из двух материалов с взаимообратными по ТКС величинами получено, что для пленочного тензорезистора его итоговый ТКС не зависит от числа циклов формирования, а сама модель (9) идентична модели (4) для многослойной (двухслойной) модели пленочного тензорезистора, сформированного из двух пленок тензоматериалов.

Многоуровневая структура тензорезистора с отдельной пленкой из материала с положительным ТКС

В отличие от предыдущей структуры резистивного слоя, состоящего из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов, рассматриваемая структура содержит верхний слой из материала с положительным ТКС, который одновременно служит защитным слоем для нижележащих монослоев (рис. 4).

Рассматриваемая структура резистивного слоя тонкопленочного ТР может быть сформирована по двум дополнительным вариантам:

- с нижележащим слоем из сплава с ТКС < 0 (1-й дополнительный вариант);
- с верхним слоем из сплава с ТКС > 0 (2-й дополнительный вариант).

Сопротивление сформированной нижней пленки можно представить в виде следующей ММ:

- для первого дополнительного варианта

$$r_1 = \frac{1}{m_1} \Delta\rho_{S1} N = R_{S1} N; \quad (10)$$

- для второго дополнительного варианта

$$r_1 = \frac{1}{m'_1} \Delta\rho_{S2} N = R_{S2} N, \quad (11)$$

где m_1 , m'_1 – количество циклов напыления при формировании слоя из нижней пленки ($m_1 = Mt_1$; $m'_1 = Mt'_1$); M – скорость вращения карусели; t_1 , t'_1 – время напыления нижнего слоя по первому и второму вариантам.

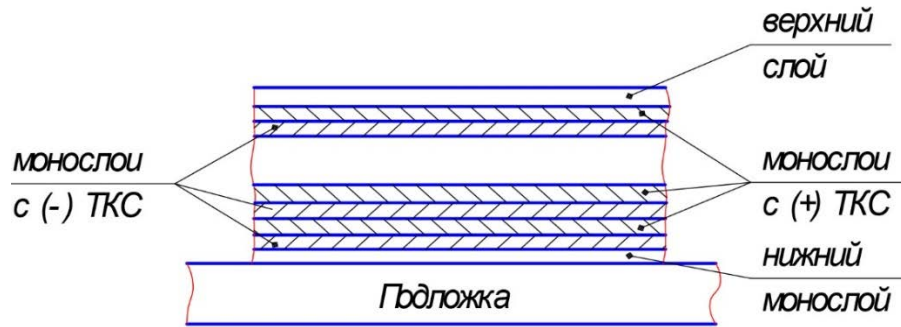


Рис. 4. Многослойная структура тонкопленочного ТР с взаимно чередующимися монослоями двух резистивных материалов и отдельным слоем из материала с положительным ТКС

Сопротивление последующего слоя из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов может быть представлено в виде ММ:

$$r_2 = \frac{1}{m_2} \frac{\Delta\rho_{s1}\Delta\rho_{s2}}{\Delta\rho_{s1} + \Delta\rho_{s2}} N = R_{s1-2} N, \quad (12)$$

где m_2 – количество циклов совместного напыления взаимно чередующихся монослоев резистивных материалов с противоположными по знаку ТКС; $m_2 = Mt_2$; t_2 – время совместного напыления монослоев.

Сопротивление последнего верхнего слоя из материала с положительным ТКС:

$$r_3 = \frac{1}{m_3} \Delta\rho_{s3} N = R_{s3} N, \quad (13)$$

где m_3 ($m_3 = Mt_3$) – число циклов формирования верхнего слоя тензорезистивных материалов с ТКС > 0 ; t_3 – время напыления при формировании последнего (верхнего) слоя тензопленки с положительным ТКС.

Общее сопротивление тонкопленочного ТР с исследуемой структурой резистивного слоя можно определить из следующих аналитических ММ:

– для первого принятого варианта:

$$R_{06} = \frac{\Delta\rho_{s1}\Delta\rho_{s2}}{m_3\Delta\rho_{s1} + m_2(\Delta\rho_{s1} + \Delta\rho_{s2}) + m_1\Delta\rho_{s2}} N; \quad (14)$$

– для второго дополнительного варианта:

$$R'_{06} = \frac{\Delta\rho_{s1}\Delta\rho_{s2}}{m'_3\Delta\rho_{s1} + m'_2(\Delta\rho_{s1} + \Delta\rho_{s2}) + m'_1\Delta\rho_{s1}} N, \quad (15)$$

здесь m'_2 , m'_3 – количество циклов совместного напыления из взаимно чередующихся монослоев и циклов напыления только слоя из резистивного материала с положительным ТКС соответственно для второго дополнительного варианта.

Зависимость сопротивления многослойного тонкопленочного ТР с рассматриваемой структурой резистивного слоя от температуры T может быть представлена в виде следующих аналитических ММ:

– для первого дополнительного варианта:

$$R(T) \approx \frac{n_1\Delta\rho_{s1}(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T)}{(1 + \alpha_1\Delta T)(am_1 + m_2) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)(m_1 + m_2)} N; \quad (16)$$

– для второго дополнительного варианта:

$$R(T) \approx \frac{n_1\Delta\rho_{s1}(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T)}{(1 + \alpha_1\Delta T)[m'(1 + a_1) + m'_2] + m'_2n_1(1 + \alpha_2\Delta T)} N, \quad (17)$$

где a и a_1 – коэффициенты, характеризующие соотношение циклов напыления.

ТКС (α_R) тонкопленочного ТР со структурой резистивного слоя из взаимно чередующихся монослоев и отдельным слоем из материала с положительным ТКС:

– для первого дополнительного варианта

$$\alpha_R \approx \frac{m_{об} (a\alpha_2 + n_1\alpha_1) + m_2 (\alpha_2 + an_1\alpha_1)}{m_{об} [a(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)] + m_2 [(1 + \alpha_1\Delta T) + an_1(1 + \alpha_2\Delta T)]} \quad (18)$$

или через время напыления

$$\alpha_R \approx \frac{t_1 (a\alpha_2 + n_1\alpha_1) + t_2 (\alpha_2 + an_1\alpha_1)}{t_1 [a(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)] + t_2 [(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)]}, \quad (19)$$

где $m_{об}$ – общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения требуемой величины поверхностного сопротивления резистивного слоя ρ_s :

$$m_{об} = m_1(1 + a) + m_2 = M [t_1(1 + a) + t_2].$$

Из анализа выражений (18) и (19) следует, что условием управления величиной ТКС является $|a\alpha_2| \approx |n_1\alpha_1|$ и $|\alpha_2| \approx |an_1\alpha_1|$;

– для второго дополнительного варианта:

$$\alpha'_R \approx \frac{m'_{об}\alpha_2 + m'_2 n_1\alpha_1}{m'_{об}(1 + \alpha_1\Delta T) + m'_2 n_1(1 + \alpha_2\Delta T)} \quad (20)$$

или через время напыления:

$$\alpha'_R \approx \frac{t'_1(1 + a_1)\alpha_2 + t'_2(\alpha_2 + n_1\alpha_1)}{t'_1(1 + a_1)(1 + \alpha_1\Delta T) + t'_2[(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)]}, \quad (21)$$

где $m_{об}$ – общее число циклов напыления, необходимое для получения штатной величины ρ_s :

$$m'_{об} = m'_1(1 + a) + m'_2 = M [t'_1(1 + a) + t'_2]; \quad (22)$$

– для первого дополнительного варианта:

$$m_2 = \left| \frac{m_{об}(a\alpha_2 + n_1\alpha_1)}{\alpha_2 + an_1\alpha_1} \right|; \quad (23)$$

– для второго дополнительного варианта:

$$m'_2 = \left| \frac{m'_{об}\alpha_2}{n_1\alpha_1} \right|. \quad (24)$$

Таким образом, для рассмотренных вариантов формирования резистивного слоя со структурой из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов с противоположными по знаку ТКС и отдельным слоем (верхним) из материала с положительным ТКС определяется следующий технологический маршрут формирования:

– методом магнетронного напыления и количеством циклов m_1 формируется нижний слой резистивной структуры из материала с отрицательным (или положительным) ТКС:

$$R_{s1} = \frac{1}{m_1} \Delta \rho_{s1}. \quad (25)$$

Расчетная величина поверхностного сопротивления этого слоя определяется из выражения

$$R_{s1} = \frac{R_s R_{s1-2} (1 + a)}{R_{s1-2} - R_s}, \quad (26)$$

где ρ_s – требуемая величина поверхностного сопротивления резистивного слоя;

– методом магнетронного напыления при вращающейся карусели одновременно с двух мишеней-катодов последовательно формируется слой резистивной структуры из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов при количестве циклов совместного напыления m_2 (или m'_2), которые рассчитываются по формуле (23) или (24):

$$R_{S1-2} = \frac{R_s R_{S1}}{R_{S1} - R_s (1 + a)}; \quad (27)$$

– методом магнетронного напыления при вращающейся карусели в течение m_3 -циклов напыления ($m_3 = a m_1$) формируется слой резистивной структуры из материала с положительным ТКС до достижения величины поверхностного сопротивления этого слоя $R_{S3} = R_{S1}/a$:

$$R_{S3} = \frac{R_s R_{S1} R_{S1-2}}{R_{S1} R_{S1-2} - R_s (R_{S1} + R_{S1-2})}. \quad (28)$$

Инструментальные методы повышения стабильности тонкопленочных датчиков

Несмотря на достаточно высокий технический уровень разработанной и серийно освоенной технологии изготовления интегральных ЧЭ тензорезисторных ДФВ неизбежной, к сожалению, проблемой остается обеспечение температурной и долговременной стабильности сопротивлений тонкопленочных ТР.

Основными причинами отказов и временной и параметрической нестабильности ЭФХ пленочных ТР являются дефекты в слоях тонкопленочных элементов датчиков. Указанные дефекты возникают как на исходных кремниевых пластинах, так и на пластинах, которые воспринимаются в процессе изготовления микромеханических элементов.

Кроме того, накопление дефектов происходит при процессах фотолитографии, при поглощении остаточных газов в объеме вакуумной камеры и т.д. [5, 6]. Современные процессы настройки тензорезисторов позволяют получить точность порядка 10 %. Для повышения точности тензорезисторы должны подвергаться настройке, например, с помощью удаления части резистивной пленки механически, испарением определенных участков резистивной пленки электронным или лазерным лучем [7].

Важнейшими технологиями для прецизионных тонкопленочных датчиков являются термические операции, которые целесообразно проводить в две стадии:

- термоциклическая обработка в вакууме;
- термообработка на воздухе.

Импульсная обработка позволяет:

- структурировать (стабилизацию) резистивный слой (отжигать скрытые дефекты в пленке;
- упорядочивать структуру пленки, образуя мостики проводимости между отдельными зернами, в том числе и в зонах расположения отжигаемых скрытых дефектов);
- осуществлять подгонку величины сопротивлений резисторов до требуемого номинального значения без изменения их геометрии;
- также отбраковывать потенциально ненадежные резисторы с «критичными» дефектами резистивного слоя.

При создании структуры контактной группы с проводящим слоем из золота произведена замена материала адгезионного слоя на ванадий, что позволило повысить стабильность и надежность контактного сопротивления, а также расширить диапазон рабочих температур до 350 °С без ухудшения качества проводящего слоя из золота (отсутствует деградация проводящего слоя) [7–9].

При формировании топологии интегральной тензосхемы, как на мембранном, так и на балочном УЭ, применен комбинированный метод изготовления:

- напыляется сплошным слоем резистивная пленка из тензорезистивного материала с требуемой ρ_s ;
- формируется фоторезистивная маска резистивного слоя, незащищенные фоторезистом участки резистивного слоя, травятся ионно-химическим методом (рис. 5).

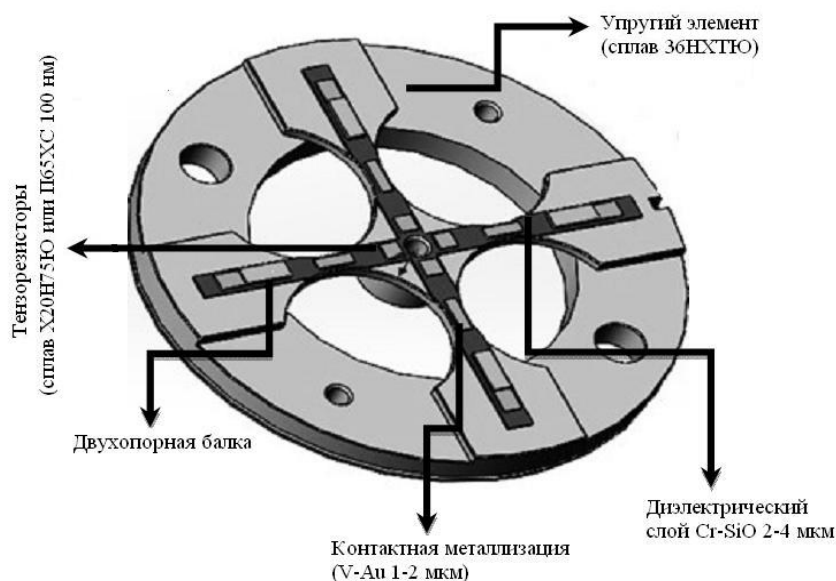


Рис. 5. Внешний вид балочного ЧЭ со сформированной на его поверхности гетерогенной пленочной системы

Технологические тренировки

На всех этапах ТП изготовления датчиков происходит накопление дефектов и несовершенств, влияние которых может привести к нестабильности и отказу датчика при испытаниях или в эксплуатации. Для повышения стабильности датчиков в процессе их изготовления предусмотрено проведение технологических тренировок (ТТ), призванных интенсифицировать деградационные процессы, особенно после завершения изготовления.

Разновидностями технологических тренировок, используемых при изготовлении МЭД, являются: термоцикловая, термотоковая и термдеформационная тренировки. Кроме того, эффективны также электротоковые тренировки, термоотжиг и захлаживание.

Электротоковая тренировка в наибольшей степени используется в металлопленочных датчиках, для которых основным регулируемым параметром является температурный коэффициент сопротивления (ТКС) ТР [10]. ТКС в тонкопленочных резисторах связан с удельным сопротивлением таким образом, что их произведение есть величина постоянная (правило Матиссена). Доказано, что при пропускании постоянного тока через пленочный резистор происходит одновременное уменьшение его сопротивления и увеличение ТКС. При тренировке импульсами тока длительностью в несколько миллисекунд, наоборот, сопротивление увеличивается, а ТКС уменьшается. Опытным путем обнаружено, что стабильными являются резистивные пленки, имеющие положительный ТКС малой величины. Отрицательный ТКС в металлопленочных ТР характеризует, как правило, нарушения в ТП формирования пленки, а также присутствие загрязняющих элементов в ее материале. Кроме того, при напылении пленки рекомендуется использовать технологические операции, которые не нарушают исходную стехиометрию резистивного материала. Такими «щадящими» операциями являются магнетронное или электронно-лучевое напыление.

Необходимо отметить, что режимы технологических тренировок индивидуальны для конкретных типов ЧЭ и датчиков, оптимальные значения управляющих параметров определяются после длительных технологических отработок и экспериментов, а сами значения и порядок воздействия управляющих факторов являются, как правило, предметом «ноу-хау» или патентуются.

Фактически механизмы действия технологических тренировок на материал или структуры МЭД сводятся к возникновению временных обратных связей, стабилизирующих или дестабилизирующих объект (пленку, ТР, ЧЭ). Основополагающими моментами при осуществляемых в процессе проведения тренировок энергетических воздействиях являются возникновение термодинамически устойчивых структур, а также уменьшение общей энергии, содержащейся в системе вследствие релаксации, образования устойчивых фаз, протекания экзотермических реакций и прочих эффектов [11–13].

**Процесс термической стабилизации параметров
сформированной тонкопленочной структуры**

Термостабилизацию сформированной тензосхемы ЧЭ целесообразно проводить в две стадии:

- термоциклическая обработка в вакууме;
- термообработка на воздухе.

Многостадийная термообработка тензосхемы в вакууме $\sim 5,0 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. ($7,75 \cdot 10^{-3}$ Па) проводится контролируемым нагревом и охлаждением. Однако выбранные режимы термостабилизации не гарантируют достижения стабильности параметров ЧЭ при окончательной сборке датчика.

Завершается процесс изготовления ЧЭ контролем величины сопротивления изоляции ($R_{из}$) сформированной тензосхемы относительно корпуса УЭ.

Обсуждения

Проведенные исследования в области обеспечения временной и параметрической стабильности в части разработки новых конструктивно-технологических решений, которые позволяют улучшить электрофизические характеристики элементов датчиков, а также повысить технологичность изготовления [14–18].

Список литературы

1. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / под ред. П. П. Мальцева. М. : Техносфера, 2005. 592 с.
2. Цыбизов П. Н. Чувствительные элементы для микроэлектронных датчиков давления информационно-измерительных систем : автореф. ... дис. к-та техн. наук. Пенза : ПГУ, 2007. URL: <https://www.dissercat.com/content/chuvstvitelnye-elementy-dlya-mikroelektronnykh-datchikov-davleniya-informatsionno-izmeritelnykh>
3. Соколов Л. В. Основы исследования и разработки в области сенсорных МЭМС-устройств // Датчики и системы. 1999. № 3. С. 13–17.
4. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М. : Техносфера, 2004. 528 с.
5. Михайлов П. Г., Омаров А. Д., Султангазинов С. К. Применение высокотемпературных датчиков физических величин на основе широкозонных полупроводников // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 2–4. С. 471–474.
6. NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, 2005–2009. URL: <http://www.nexus-mems.com> (дата обращения: 05.05.2018).
7. Achard J., Tallaire A. [et al.]. Evaluation of freestanding boron-doped diamond grown by chemical vapour deposition as substrates for vertical power electronic devices // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 100. P. 122109.
8. Модификация и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными потоками / под ред. Дж. Поути. М. : Машиностроение, 1985.
9. Хмельницкий Р. А., Талипов Н. Х., Чучева Г. В. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М. : Изд-во ИКАР, 2015. 228 с.
10. Микроэлектронные датчики давления и устройства. Разработка и производство // Сайт фирмы ПП МИДА. URL: <http://midaus.com/rus/transmitters.htm> (дата обращения: 20.07. 2024).
11. Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применение / под ред. Г. Харбеке. М. : Мир, 1989.
12. Mikhailov P. G., Slesarev Yu. N., Chulkov V. A. Mathematical Modeling of Combined Sensor Information – Measuring Systems // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 11, № 20. P. 10332–10335
13. Михайлов П. Г., Сергеев Д. А., Соколов А. В. Управление свойствами функциональных материалов высокотемпературных датчиков // Инновационные технологии в машиностроительном комплексе : сб. тр. МНПК. Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. С. 292–294.
14. Михайлов П. Г., Мокров Е. А., Скотников В. В. [и др.] Вопросы создания высокотемпературных датчиков механических величин. Материалы. Конструкции. Технологии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4. С. 61–70.
15. Джексон, Р. Новейшие датчики. М. : Техносфера, 2005. 384 с.
16. Михайлов П. Г., Ожигенов К. А., Аналиева А. У. Узлы и компоненты микроэлектронных датчиков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. № 3. С. 184–193.
17. Михайлов П. Г., Михайлов А. П., Фадеев Е. Д. Разработка физико-математических моделей чувствительных элементов преобразователей физических величин систем управления // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2019. № 1. С. 22–26.

18. Михайлов П. Г., Лапшин В. И. Моделирование и конструирование кремниевых чувствительных элементов емкостных датчиков давлений // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 5. С. 128–133.

References

1. Mal'tsev P.P. (ed.). *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. Ot issledovaniy k razrabotkam = Nano- and microsystem engineering. From research to development*. Moscow: Tekhnosfera, 2005:592. (In Russ.)
2. Tsybizov P.N. Sensitive elements for microelectronic pressure sensors of information and measuring systems: PhD abstract. Penza: PGU, 2007. (In Russ.). Available at: <https://www.dissercat.com/content/chuvstvitelnye-elementy-dlya-mikroelektronnykh-datchikov-davleniya-informatsionno-izmeritel'n>
3. Sokolov L.V. Fundamentals of research and development in the field of sensor MEMS devices. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 1999;(3):13–17. (In Russ.)
4. Varadan V., Vinoy K., Dzhoze K. *VCh MEMS i ikh primeneniye = HF MEMS and their application*. Moscow: Tekhnosfera, 2004:528. (In Russ.)
5. Mikhaylov P.G., Omarov A.D., Sultangazinov S.K. Application of high-temperature sensors of physical quantities based on wide-band semiconductors. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017;(2–4):471–474. (In Russ.)
6. *NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, 2005–2009*. Available at: <http://www.nexus-mems.com> (accessed 05.05.2018).
7. Achard J., Tallaire A. et al. Evaluation of freestanding boron-doped diamond grown by chemical vapour deposition as substrates for vertical power electronic devices. *Applied Physics Letters*. 2012;100:122109.
8. Pouti Dzh. (ed.). *Modifikatsiya i legirovanie poverkhnosti lazernymi, ionnymi i elektronnyimi potokami = Modification and alloying of the surface by laser, ion and electron flows*. Moscow: Mashinostroenie, 1985. (In Russ.)
9. Khmel'nitskiy R.A., Talipov N.Kh., Chucheva G.V. *Sinteticheskiy almaz dlya elektroniki i optiki = Synthetic diamond for electronics and optics*. Moscow: Izd-vo IKAR, 2015:228. (In Russ.)
10. Microelectronic pressure sensors and devices. Development and production. *Sayt firmy PG MIDA = Website of PG MIDA company*. (In Russ.). Available at: <http://midaus.com/rus/transmitters.htm> (accessed 20.07.2024).
11. Kharbeke G. (ed.). *Polikristallicheskie poluprovodniki. Fizicheskie svoystva i primeneniye = Polycrystalline semiconductors. Physical properties and applications*. Moscow: Mir, 1989. (In Russ.)
12. Mikhailov P.G., Slesarev Yu.N., Chulkov V.A. Mathematical Modeling of Combined Sensor Information – Measuring Systems. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017;11(20):10332–10335.
13. Mikhaylov P.G., Sergeev D.A., Sokolov A.V. Control of the properties of functional materials of high-temperature sensors. *Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroitel'nom komplekse: sb. tr. MNPk = Innovative technologies in the machine-building complex : proceedings of the international scientific and practical conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2012:292–294. (In Russ.)
14. Mikhaylov P.G., Mokrov E.A., Skotnikov V.V. et al. Issues of creating high-temperature sensors of mechanical quantities. Materials. Constructions. Technologies. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2013;(4):61–70. (In Russ.)
15. Dzhekson R. *Noveyshie datchiki = The latest sensors*. Moscow: Tekhnosfera, 2005:384. (In Russ.)
16. Mikhaylov P.G., Ozhikenov K.A., Analieva A.U. Nodes and components of microelectronic sensors. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences*. 2015;(3):184–193. (In Russ.)
17. Mikhaylov P.G., Mikhaylov A.P., Fadeev E.D. Development of physico-mathematical models of sensitive elements of converters of physical quantities of control systems. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2019;(1):22–26. (In Russ.)
18. Mikhaylov P.G., Lapshin V.I. Modeling and construction of silicon sensing elements of capacitive pressure sensors. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences*. 2013;(5):128–133. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Петр Григорьевич Михайлов

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

Petr G. Mikhaylov

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

Алексей Петрович Михайлов

начальник группы,
ООО «Газпромнефть–Цифровые решения»
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Киевская, 5, корп. 4)
E-mail: krendeleshik@gmail.com

Aleksey P. Mikhaylov

Head of group,
GazpromNeft–Digital Solutions LLC
(building 4, 5 Kievskaya street, St. Petersburg, Russia)

Илья Николаевич Пасхин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Iluha1.1000@mail.ru

Ilya N. Pashkin

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

Андрей Равильевич Ахметов

заместитель генерального директора,
ООО НПЦ «КИТ»
(Россия, г. Пенза, ул. Кустодиева, 23)
E-mail: icmus@mail.ru

Andrey R. Akhmetov

Deputy general director,
NPTS KIT LLC
(23 Kustodieva street, Penza, Russia)

Евгений Дмитриевич Фадеев

независимый исследователь
(Россия, г. Москва)
E-mail: mercenary.exe@gmail.com

Evgeny D. Fadeev

Independent researcher
(Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 11.07.2024

Поступила после рецензирования/Revised 06.08.2024

Принята к публикации/Accepted 05.09.2024

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДВОДНОГО БЕЗЭКИПАЖНОГО АППАРАТА

И. Н. Урваев¹, С. Н. Базыкин²

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

¹iurvaev@mail.ru, ²cbazykin@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальной задачей современной робототехники является разработка и выпуск подводных безэкипажных аппаратов (ПБА). Современные ПБА позволяют проводить экологический и климатический мониторинг, океанологические исследования, обслуживание глубоководных систем и объектов, поиск подводных месторождений, охрану акваторий и др. Использование ПБА позволяет не только избавить человека от опасного труда, но и дает возможность проводить широкий спектр операций, принципиально недоступных человеку. Целью данной работы является исследование гидродинамики ПБА методами компьютерного моделирования для анализа его конструкции и уточнения режимов работы блоков системы управления движителем. *Материалы и методы.* Для решения поставленных задач в работе использовались методы трехмерного моделирования с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation. *Результаты.* Предложена методика моделирования обтекания подводного безэкипажного бионического аппарата водой и проведено исследование его гидродинамических параметров. *Вывод.* Предложенная методика моделирования позволяет в деталях оценивать и визуализировать характер взаимодействия подводного аппарата с водой и оптимизировать выбор конструктивных характеристик корпуса и блоков управления исполнительными механизмами, что существенно сокращает затраты времени и стоимость проведения работ на этапах осмысления, проектирования, внедрения и эксплуатации подводной техники.

Ключевые слова: безэкипажный подводный аппарат, бионические принципы движения, гидродинамические параметры, энергоэффективность, компьютерное моделирование

Для цитирования: Урваев И. Н., Базыкин С. Н. Имитационное моделирование гидродинамических параметров подводного безэкипажного аппарата // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 58–67. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-7

COMPUTER SIMULATION OF HYDRODYNAMICS OF AN UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

I.N. Urvaev¹, S.N. Bazykin²

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

¹iurvaev@mail.ru, ²cbazykin@yandex.ru

Abstract. *Background.* The current task of modern robotics is the development and production of unmanned underwater vehicles (UUV). Modern UUVs allow for environmental and climate monitoring, oceanographic research, servicing of deep-sea systems and objects, search for underwater deposits, protection of water areas, etc. The use of UUVs allows not only to relieve a person from dangerous work, but also makes it possible to carry out a wide range of operations that are fundamentally inaccessible to a person. The aim of the work is to study the hydrodynamics of an underwater vehicle to optimize its design and units of the propulsion control system at the early stages of its design. *Materials and methods.* To solve the tasks set in the work, three-dimensional modeling methods were used using the SolidWorks Flow Simulation software module. *Results.* A method for modeling the flow of water around an unmanned underwater bionic vehicle is proposed and its hydrodynamic parameters are studied. *Conclusion.* The proposed modeling method allows for a detailed assessment and visualization of the nature of the interaction of the underwater vehicle with water and optimization of the choice of design characteristics of the hull and control units of the actuators, which significantly reduces the time and cost of work at the stages of comprehension, design, implementation and operation of underwater equipment.

Keywords: unmanned underwater vehicle, bionic principles of motion, hydrodynamic parameters, energy efficiency, computer modeling

For citation: Urvaev I.N., Bazykin S.N. Computer simulation of hydrodynamics of an unmanned underwater vehicle. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):58–67. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-7

Введение

Актуальной задачей современной робототехники является разработка и выпуск подводных безэкипажных аппаратов (ПБА). ПБА – это устройства, предназначенные для работы под водой без привязки к внешней подводной технике или кабелю, подсоединенному к кораблю-носителю, ПБА обеспечивают выполнение возложенных на них задач без участия оператора [1, 2].

Современные ПБА позволяют проводить экологический и климатический мониторинг, океанологические исследования, обслуживание глубоководных систем и объектов, поиск подводных месторождений, охрану акваторий и др. Использование ПБА позволяет не только избавить человека от опасного труда, но и дает возможность проводить широкий спектр операций, принципиально недоступных человеку [1, 2].

На мореходные показатели качества ПБА большое влияние оказывают его гидродинамические параметры. В настоящее время основными способами их оценки являются натурные или стендовые испытания. Однако при этом возникает ряд сложностей как технического, так и фундаментального характера (трудоемкость изготовления аппаратов, проведения измерений, учета масштабного эффекта и т.п.). В связи с этим все большую популярность приобретают методы компьютерного моделирования, которые позволяют оценить гидродинамику и проработать целый ряд конструктивных решений уже на ранних стадиях создания ПБА [3, 4].

Целью данной работы является исследование гидродинамики ПБА методами компьютерного моделирования для анализа его конструкции и уточнения режимов работы блоков системы управления движителем.

Материалы и методы

Гидродинамику ПБА, влияющую на мореходные показатели качества ПБА, принято характеризовать следующими параметрами [5, 6]:

- гидродинамическое сопротивление, под которым понимают силу (F , H), противодействующую движению подводного аппарата в воде;
- скорость истечения потока, т.е. скорость, с которой вода покидает поверхность подводного объекта, что влияет на образование вихрей и, соответственно, сопротивление;
- гидростатическое давление, создаваемое водой на определенной глубине, которое влияет на структуру аппарата и его способность оставаться на поверхности или опускаться на дно;
- маневренность, под которой понимается способность аппарата изменять свою траекторию или скорость в ответ на управляющие действия;
- ходкость, под которой понимается способность осуществлять движение с максимальной скоростью хода при минимальных энергетических затратах.

Оптимизация гидродинамических параметров помогает достичь лучшей производительности ПБА и повысить его энергоэффективность. Для оценивания гидродинамических параметров исследуемый подводный аппарат можно представить как некоторое тело, совершающее перемещения в подводном пространстве, а оценивание его свойств осуществляется с помощью законов гидромеханики, описывающих движение тела в вязкой среде, как сопротивляющейся движению тела, так и активно воздействующей на него.

Однако на гидродинамические параметры ПБА оказывают влияние множество факторов, к основным из которых относятся следующие [7, 8]:

- форма аппарата: гидродинамика зависит от того, как аппарат спроектирован (например, более обтекаемые формы способствуют снижению гидродинамического сопротивления);
- геометрические размеры аппарата: большие объекты обычно вызывают большее сопротивление из-за увеличенной площади контактной поверхности;
- скорость движения аппарата: сопротивление увеличивается с ростом скорости;
- температура и плотность воды: эти параметры влияют на вязкость воды, что, в свою очередь, сказывается на сопротивлении.
- турбулентность потока: если вода вокруг объекта движется неравномерно, это может привести к увеличению сопротивления.

Наличие большого числа факторов, влияющих на гидродинамические параметры, усложняет расчет мореходных показателей качества ПБА, поэтому для их определения целесообразно использовать методы имитационного моделирования. В настоящее время существует достаточное количество компьютерных программ имитационного моделирования, таких как Siam Well Test, ANSYS fluent, COMSOL Multiphysics®, SolidWorks Flow Simulation и многие другие. Наиболее полно условиям моделирования для данной задачи отвечает программный модуль SolidWorks Flow Simulation. Выбор данного модуля объясняется такими его достоинствами, как дружелюбный к пользователю интерфейс; сокращение времени на задание каждого проекта; стабильность работы программы; возможность создавать геометрию и производить расчеты в одном программном комплексе; хорошее качество поверхностей, что крайне важно для гидродинамических расчетов [9].

Программа сама подбирает уровень адаптации области расчета вблизи поверхности твердого тела (в нашем случае корпуса ПБА) и в областях заметного изменения давления и скорости без участия пользователя; возможность отслеживания изменения величин сил и моментов в графическом и численном видах в процессе расчета; распараллеливание процесса расчета; широкие возможности постпроцессора для визуализации результатов расчета. Кроме того, программный модуль SolidWorks Flow Simulation позволяет выполнять все расчеты и анализы «в одном окне», что значительно снижает вероятность возникновения ошибок импорта/экспорта данных [9].

Результаты

Естественный отбор обеспечил оптимальную конструкцию тела рыбы, приспособленность к ареалу обитания, условиям окружающей среды, повышенную эффективность перемещения, поэтому в работе отдано предпочтение ПБА с бионической формой корпуса. Такие ПБА имеют гибкую конструкцию, производят значительно меньше шума в процессе движения, обладают большей маневренностью и меньшим воздействием на окружающую обстановку (не поднимают ил со дна, тихо работают, оставляют менее заметный след на воде) [10].

Авторами предлагается конструкция ПБА бионического типа (рис. 1).

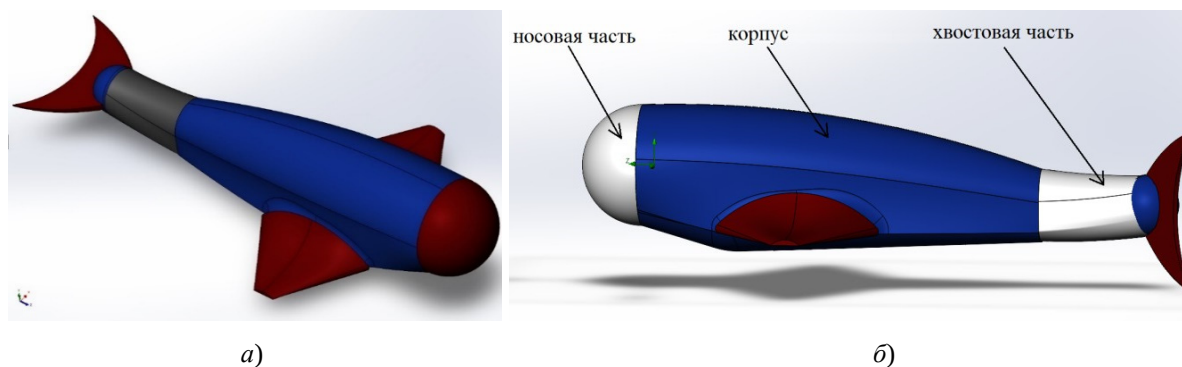


Рис. 1. ПБА бионического типа:
а – вид сбоку; б – вид сверху

Условно предложенную конструкцию подводного аппарата можно разбить на три части (рис. 1,б). Передняя часть – носовая, в ней располагают блоки, предназначенные для мониторинга и навигации. Средняя часть представляет корпус аппарата, в нем располагаются элементы питания и системы управления. Хвостовая часть разработанного аппарата состоит из симметричного хвоста и движителей, прикрепленных к основанию корпуса аппарата, которые за счет линейного перемещения позволяют совершать разные виды движения в воде, например, вертикальное, как у тунца, и горизонтальное, как у дельфина.

Выбранный тип движителя позволяет обеспечить шесть степеней свободы: параметры x, y, z представляют поступательные скорости, а q, r, p представляют собой угловые скорости, измеренные относительно x_b, y_b, z_b координат (рис. 2).

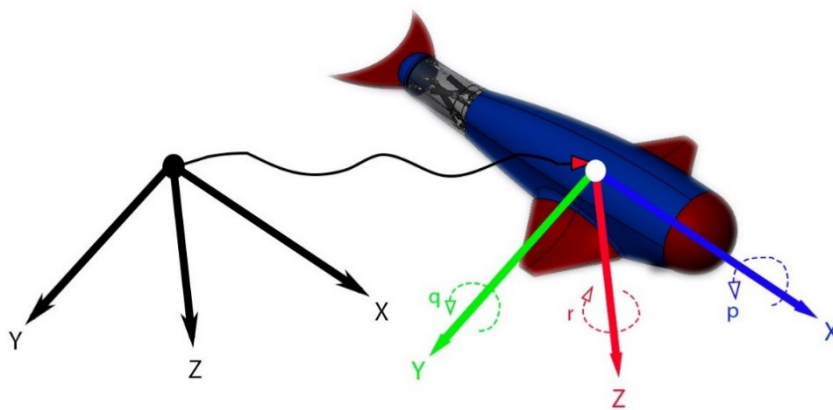


Рис. 2. Система координат выбранного типа двигателя

На рис. 3 представлены геометрические размеры исследуемого ПБА.

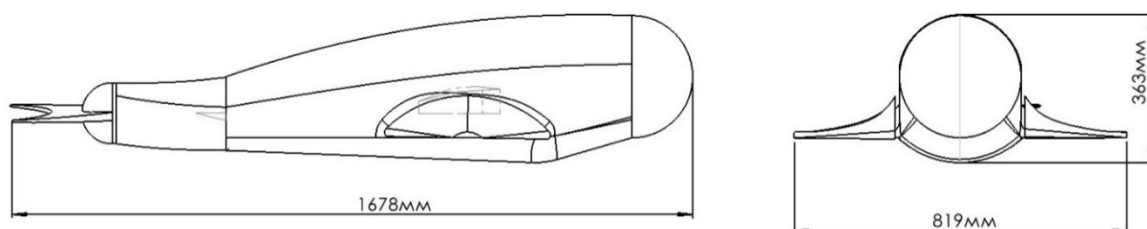


Рис. 3. Геометрические размеры исследуемого ПБА

Основными этапами разработки компьютерной модели в SolidWorks Flow Simulation являются: создание 3D-модели, построение сетки расчетной области, наложение граничных условий, визуализация полученных результатов.

Методика проведения исследования гидродинамических параметров ПБА заключается в следующем. На первом этапе задаются начальные параметры: в качестве жидкости используется морская вода, температура выбрана равной средней температуре мирового океана 17,5 °C, давление водяной среды выбрано равным 101 325 Па, что соответствует давлению на глубине 10 м.

На рис. 4–8 показаны интерфейсные окна программного модуля SolidWorks Flow Simulation, с помощью которых задаются начальные параметры.

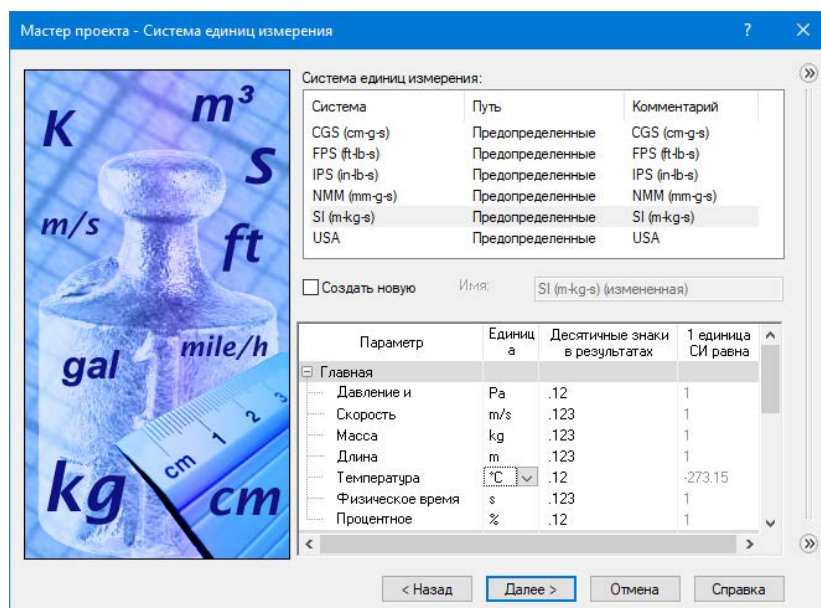


Рис. 4. Выбор и задание единиц измерения

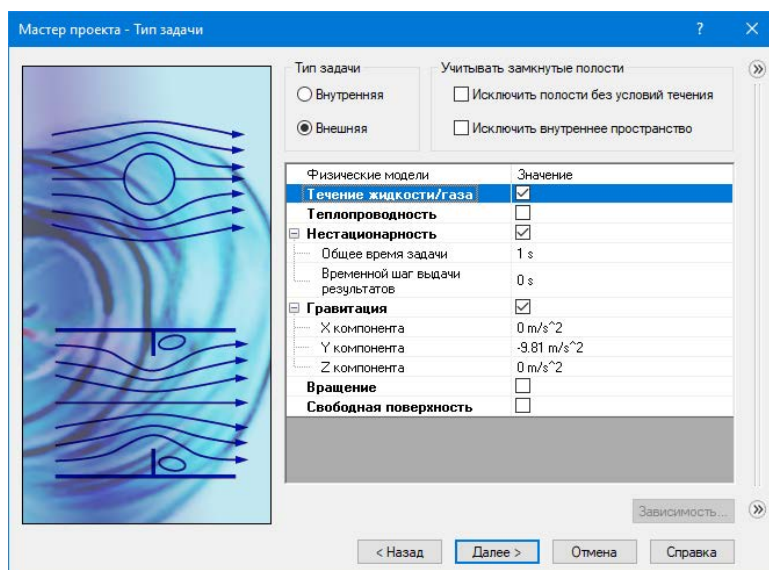


Рис. 5. Задание типа задачи

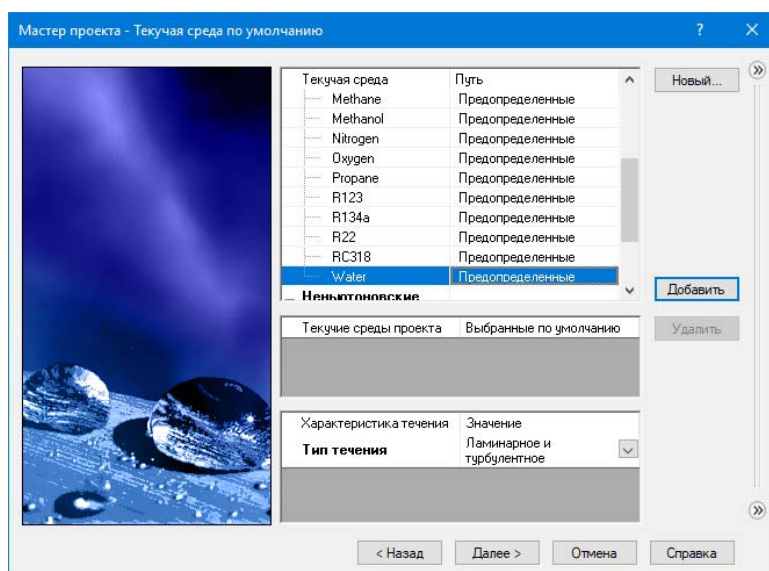


Рис. 6. Выбор среды

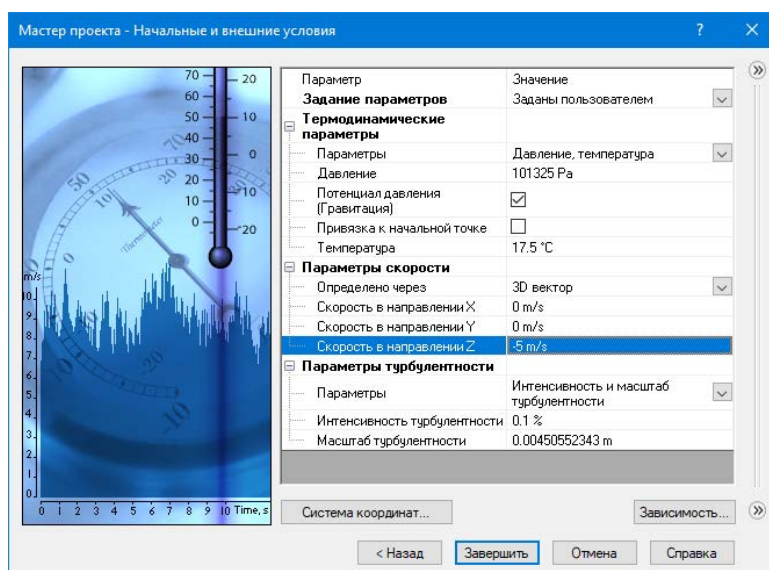


Рис. 7. Начальные и внешние условия моделирования

На втором этапе определяют расчетную область моделирования (рис. 8).

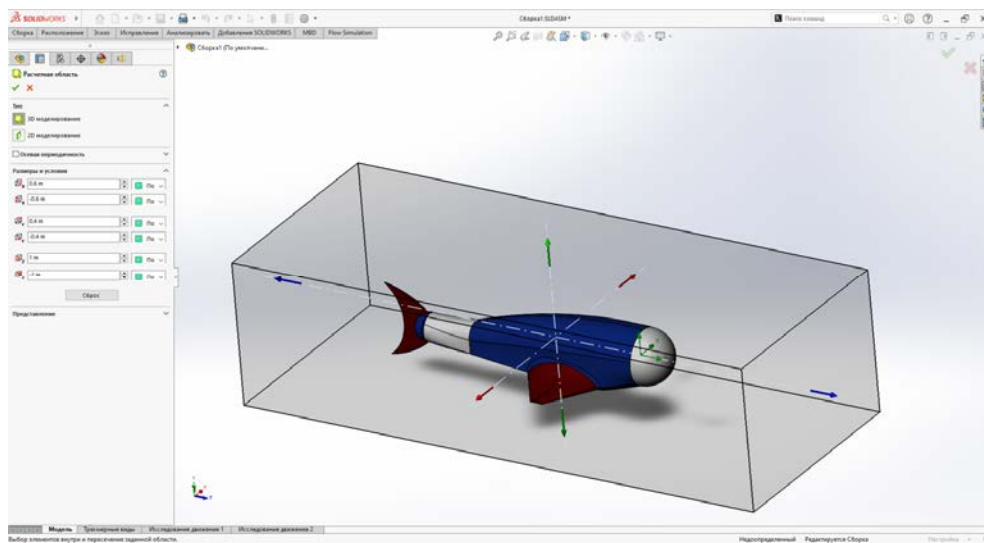


Рис. 8. Расчетная область моделирования

На третьем этапе устанавливаем цели моделирования: выбираем силу гидростатического сопротивления объекта жидкости, скорость течения жидкости по оси Z и давление жидкости на корпус исследуемого аппарата.

На четвертом этапе запускаем моделирование внешнего потока жидкости вокруг подводного аппарата.

На заключительном этапе оцениваются результаты имитационного моделирования.

Результаты моделирования давления потока жидкости на корпус ПБА приведены на рис. 9.

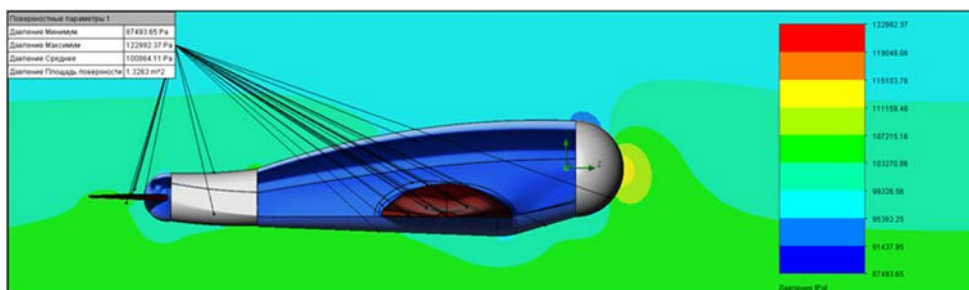


Рис. 9. Эпюра давлений потока

Анализ результатов моделирования показывает, что жидкость оказывает максимальное давление на носовую часть корпуса аппарата, охватывая малую область, после чего давление резко падает, создавая «яму низкого давления» под корпусом аппарата, и далее равномерно распределяется вплоть до хвостовой части. Максимальное давление на корпус составило $P_{\max} = 116$ кПа, минимальное давление – $P_{\min} = 90$ кПа, среднее значение давления – $P_{\text{ср}} = 100$ кПа.

Далее было проведено исследование ПБА при разных положениях хвостового движителя. На рис. 10, 11 приведены результаты моделирования при изменении скорости потока жидкости в горизонтальном положении хвостового движителя (как у дельфина).

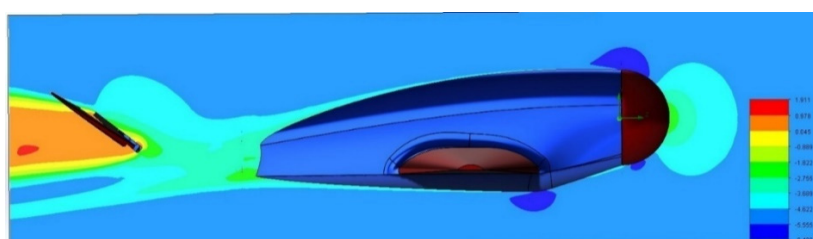


Рис. 10. Эпюра изменения потока жидкости при горизонтальном положении хвостового движителя

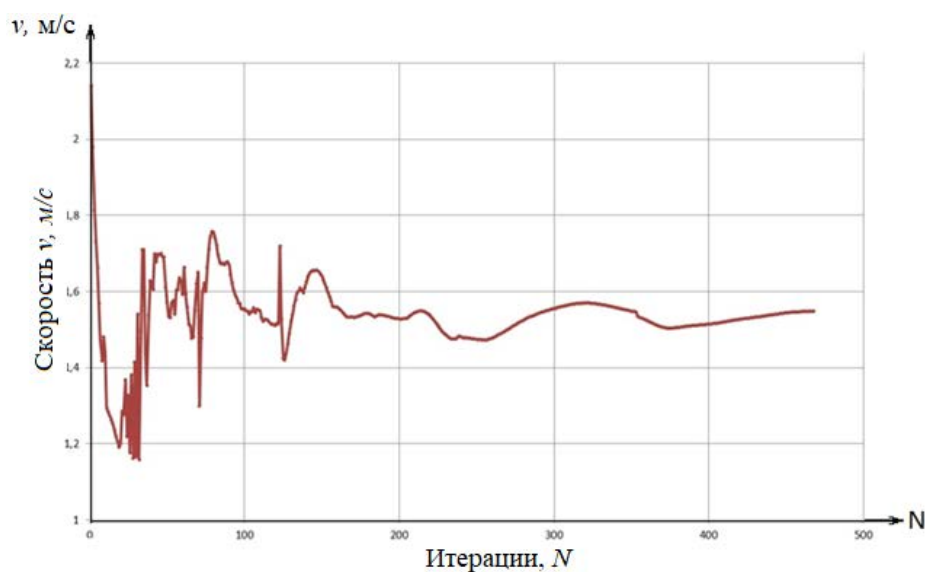


Рис. 11. Зависимость скорости потока жидкости от номера итерации при горизонтальном положении хвостового движителя

На рис. 12, 13 приведены результаты моделирования при изменении минимальной скорости потока жидкости в вертикальном положении хвоста (как у тунца). Таким образом минимальная скорость потока жидкости составила 1,2 м/с.

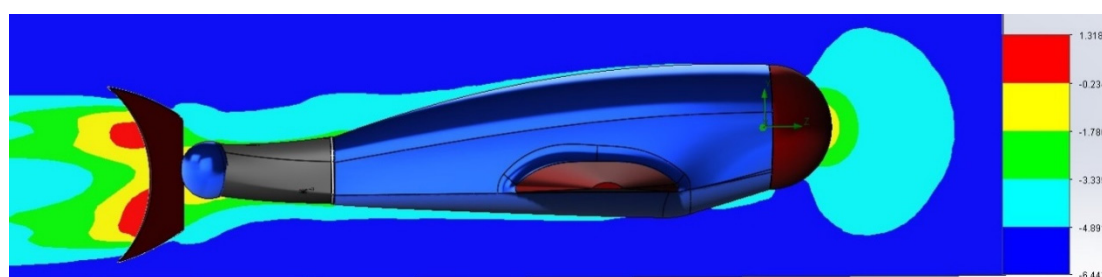


Рис. 12. Эпюра изменения потока жидкости при вертикальном положении хвостового движителя

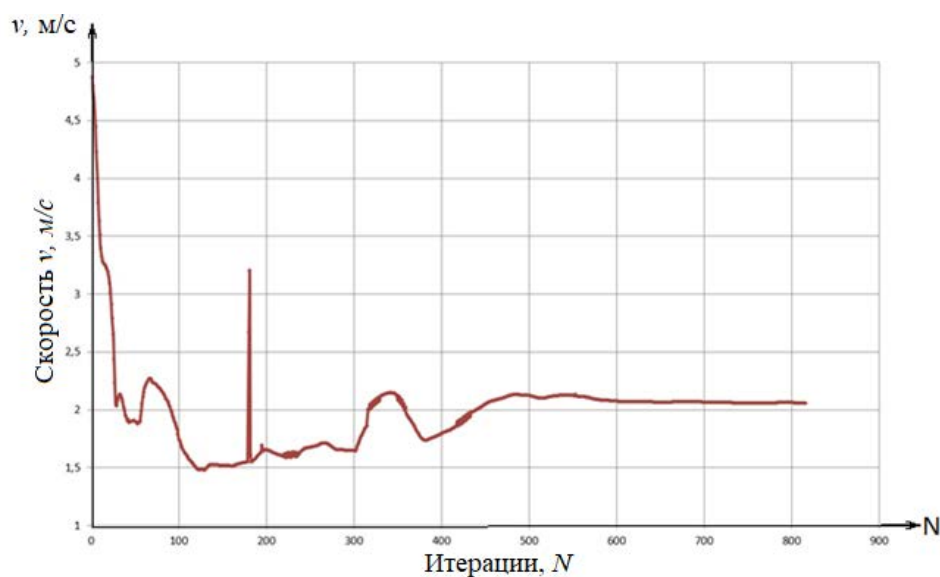


Рис. 13. Зависимость скорости потока жидкости от номера итерации при вертикальном положении хвостового движителя

Анализ результатов исследования показал, что при вертикальном положении хвостового движителя скорость потока больше, чем при горизонтальном, и составляет 1,5 м/с. Следовательно,

для обеспечения ходкости ПБА целесообразно использовать вертикальное положение хвостового движителя, а маневренность ПБА обеспечивается при горизонтальном положении хвостового движителя.

На рис. 14, 15 приведены результаты исследования гидростатического сопротивления при разных положениях хвостового движителя.

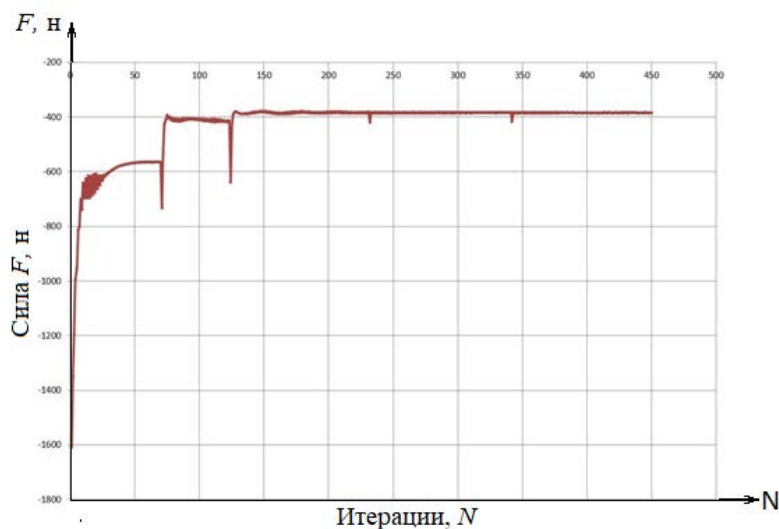


Рис. 14. Зависимость гидродинамического сопротивления от номера итерации при вертикальном положении хвостового движителя

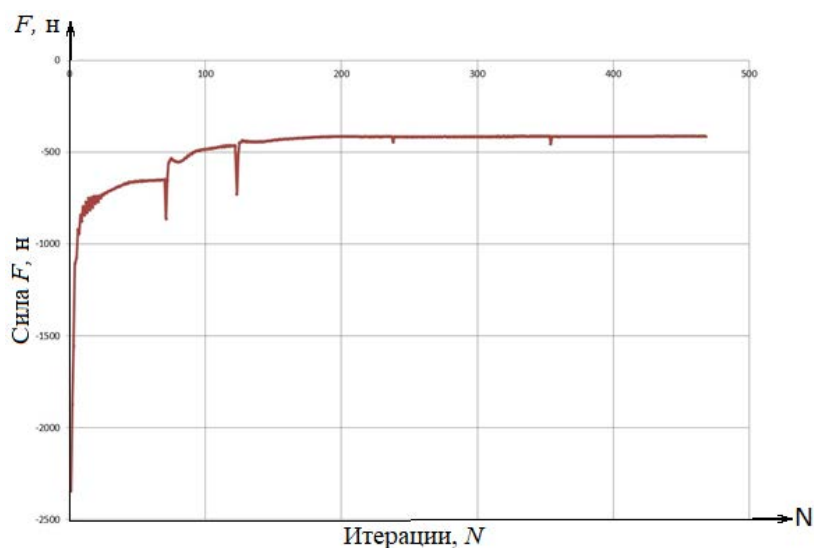


Рис. 15. Зависимость гидродинамического сопротивления от номера итерации при горизонтальном положении хвостового движителя

Анализ результатов моделирования показывает, что гидродинамическое сопротивление ПБА при вертикальном положении составляет 400 Н, а в горизонтальном положении хвоста — 500 Н. Следовательно, меняя положение хвостового движителя, можно регулировать маневренность и ходкость подводного аппарата.

Заключение

Таким образом, предложенная методика представляет собой эффективное средство моделирования обтекания корпусных элементов подводных аппаратов, позволяющее оперативно оценивать их мореходные качества, в частности, гидродинамическое сопротивление, скорость истечения потока, гидростатическое давление.

С помощью предложенной методики были получены зависимости гидродинамических характеристик конструкции подводного безэкипажного аппарата бионического типа. Это

позволило значительно сократить затраты времени и стоимость проведения работы на этапах проектирования, внедрения и эксплуатации подводной техники.

Список литературы

1. Урваев И. Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 44–51. doi: 10.21685/2307-5538-2021-1-5. EDN: TBKHZY
2. Shukla A., Karki H. Application of robotics in o shore oil and gas industry—A review Part II. Robot // Autonomous Systems. 2016. Vol. 75. P. 508–524.
3. González-García J., Gómez-Espinosa A., Cuan-Urquizo E. [et al.]. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. P. 1256.
4. Zhou K., Liu J., Chen W. Numerical Study on Hydrodynamic Performance of Bionic Caudal Fin // Appl. Sci. 2016. Vol. 6. P. 15.
5. Kruusmaa M., Fiorini P., Megill W. [et al.]. FILOSE for Svenning: A Flow Sensing Bioinspired Robot // IEEE Robot. Autom. Mag. 2014. Vol. 21. P. 51–62.
6. Flow Simulation 2009 Tutorial. URL: <http://solidpro.ru/index.php/topic/1093-solidworks-flow-simulation-2009-tutorial-rus>
7. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion // IEEE J. Ocean. Eng. 1999. Vol. 24. P. 237–252.
8. Shriyam S., Agrawal A., Behera L., Saxena A. Robotic Fish Design and Control Based on Biomechanics // Proceedings of the Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems (Kanpur, India, 13–15 March 2014). 2014. Vol. 47.

References

1. Urvaev I.N. Navigation of a mobile robot based on laser rangefinder methods. *Izmerenie. Monitoring. Up-ravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(1):44–51. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2021-1-5. EDN: TBKHZY
2. Shukla A., Karki H. Application of robotics in o shore oil and gas industry—A review Part II. Robot. *Autono-mous Systems*. 2016;75:508–524.
3. González-García J., Gómez-Espinosa A., Cuan-Urquizo E. et al. Autonomous Underwater Vehicles: Locali-zation, Navigation, and Communication for Collaborative Missions. *Applied Sciences*. 2020;10:1256.
4. Zhou K., Liu J., Chen W. Numerical Study on Hydrodynamic Performance of Bionic Caudal Fin. *Appl. Sci*. 2016;6:15.
5. Kruusmaa M., Fiorini P., Megill W. et al. FILOSE for Svenning: A Flow Sensing Bioinspired Robot. *IEEE Robot. Autom. Mag*. 2014;21:51–62.
6. *Flow Simulation 2009 Tutorial*. Available at: <http://solidpro.ru/index.php/topic/1093-solidworks-flow-simu-lation-2009-tutorial-rus>
7. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J.B.C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE J. Ocean. Eng*. 1999;24:237–252.
8. Shriyam S., Agrawal A., Behera L., Saxena A. Robotic Fish Design and Control Based on Biomechanics. *Proceedings of the Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems (Kanpur, India, 13–15 March 2014)*. 2014;47.

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Николаевич Урваев

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

Ilya N. Urvaev

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

Сергей Николаевич Базыкин

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cbazykin@yandex.ru

Sergey N. Bazykin

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

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

Поступила в редакцию/Received 12.08.2024

Поступила после рецензирования/Revised 09.09.2024

Принята к публикации/Accepted 04.10.2024

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 535.2; 538.3

doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-8

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛЬБЕДОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. Дж. Алиева¹, Х. С. Алиева², М. Г. Ашрафов³, Н. Х. Мустафазаде⁴

^{1, 2, 3, 4} Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджанская Республика
¹ amidec.b@mail.ru, ² a.xumar555@mail.ru, ³ esrefov9955@gmail.com, ⁴ nm_609@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Альbedo земной поверхности является важным показателем, определяющим энергобаланс, существующий между нашей планетой и атмосферой. В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации альбедометрических измерений, осуществляемых спектрометрической аппаратурой, установленной на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Целью работы является решение задачи оптимизации альбедометрических измерений с учетом логарифмической связи между необработанными первичными цифровыми отсчетами (DN) и реальным показателем отражения природных и искусственных земных объектов в красном, зеленом и синем спектральных диапазонах. Объектом исследования являются альбедометрические измерения, осуществляемые БПЛА. Предметом исследования является оптимизация альбедометрических измерений в узких спектральных диапазонах. *Материалы и методы.* С помощью вариационного метода исследуется оптимальная зависимость показателя отражения земных объектов от зенитного угла позиции БПЛА относительно исследуемого объекта. Критерием оптимизации является целевой функционал в виде интегрированной величины DN по всему диапазону изменения указанного зенитного угла. В оптимальном режиме этот функционал должен достичь максимума при условии наложения некоторого ограничительного условия на указанную зависимость. *Результаты.* С применением вариационного метода оптимизации вычислен оптимальный вид указанной зависимости. Показано, что результаты проведенной оптимизации косвенно подтверждаются данными известных экспериментальных исследований. *Вывод.* Выбор оптимального соотношения между указанным зенитным углом и показателем отражения объектов позволяет повысить эффективность использования БПЛА в поисковых целях.

Ключевые слова: альbedo, спектрометр, БПЛА, оптимизация, зенитный угол

Для цитирования: Алиева А. Дж., Алиева Х. С., Ашрафов М. Г., Мустафазаде Н. Х. Оптимизация альбедометрических измерений с применением беспилотного летательного аппарата // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 68–75. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-8

OPTIMIZATION OF ALBEDOMETRIC MEASUREMENTS USING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.J. Alieva¹, Kh.S. Alieva², M.G. Ashrafov³, N.Kh. Mustafazade⁴

^{1, 2, 3, 4} National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan
¹ amidec.b@mail.ru, ² a.xumar555@mail.ru, ³ esrefov9955@gmail.com, ⁴ nm_609@mail.ru

Abstract. Background. The albedo of the earth's surface is an important indicator that determines the energy balance that exists between our planet and the atmosphere. The issues of optimization of albedometric measurements carried out by spectrometric equipment installed on board an unmanned aerial vehicle (UAV) are considered. The aim of the work is to solve the problem of optimizing albedometric measurements, taking into account the logarithmic relationship between the raw primary digital readings (DN) and the real indicator of reflection of natural and artificial terrestrial objects in the red, green and blue spectral ranges. The object of the study is albedometric measurements carried out by UAVs. The subject of the study is the optimization of albedometric measurements in narrow spectral ranges. *Materials and methods.* Using the variational method, the optimal dependence of the reflection index of terrestrial objects on the zenith angle of the UAV position relative to the object under study is investigated. The optimization criterion is the target functional in the form of an integrated value DN over the entire range of the change in the specified zenith angle. In the optimal mode, this functionality should reach its maximum if some restrictive condition is imposed on the specified dependence. *Results.* Using the variational optimization method, the optimal type of the specified dependence is calculated. It is shown that the results of the optimization are indirectly confirmed by the data of well-known experimental studies. *Conclusion.* Choosing the optimal ratio between the specified zenith angle and the reflection index of objects makes it possible to increase the efficiency of using UAVs for search purposes.

Keywords: albedo, spectrometer, UAV, optimization, zenith angle

For citation: Alieva A.J., Alieva Kh.S., Ashrafov M.G., Mustafazade N.Kh. Optimization of albedometric measurements using an unmanned aerial vehicle. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):68–75. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-8

Введение

Важность исследования энергобаланса всей планеты обусловила проведение масштабных работ по измерению альbedo земной поверхности спутниковыми средствами [1, 2]. В настоящее время спутниковые средства позволяют осуществлять такие измерения с периодом 2–3 дней и пространственным разрешением от 10 м (*Sentinel 2*) до нескольких сантиметров (*Digital Globe*) [3–6]. Вместе с тем результаты спутниковых измерений подвержены влиянию атмосферных условий. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) свободны от этого недостатка и при хорошем энергообеспечении позволяют проводить альбедометрические измерения на площади $0,01 \div 100 \text{ км}^2$ [7]. БПЛА, оснащенные миниатюрными мультиспектрометрами, вырабатывают спектральную информацию в виде *DN* с 8-битовой разрядностью [8–11]. Эффект виньетирования приводит к тому, что *DN*-данные, выданные мультиспектрометром в отдельных спектральных каналах, оказываются в нелинейной зависимости от показателей отражения реальных объектов. Этому способствуют также некоторые свойства камеры, построенной на базе матриц элементов с зарядовой связью (*CCD*), используемых в мультиспектрометрах [12].

Как отмечается в работе [13], определение альbedo с применением БПЛА проходит через три этапа. На первом этапе необходимо осуществить радиометрическую калибровку *DN*-данных мультиспектрометра. На втором этапе откалиброванные данные, т.е. реальные данные отражения объектов земной поверхности, корректируются по зенитному углу положения БПЛА относительно исследуемого объекта на поверхности Земли. Указанный зенитный угол легко может быть вычислен на бортовом процессоре БПЛА, имея для этого координаты БПЛА и исследуемой точки на поверхности Земли. На третьем этапе полученные узкоспектральные альbedo определенным образом формируются в широкополосное альbedo.

Вкратце охарактеризуем указанные этапы формирования широкополосного альbedo.

Согласно статье [13] экспериментально установлено, что на первом этапе между необработанными *DN*-данными и реальными значениями отражения существует логарифмическая связь, т.е.

$$Z = a [\ln(x+1)]^b, \quad (1)$$

где *Z* – необработанные *DN*-данные; *x* – отражение земных объектов; *a*, *b* – постоянные величины. Во втором этапе осуществляется коррекция *Z* по реальному зенитному углу положения БПЛА относительно исследуемой точки. На третьем этапе осуществляется линейно взвешенное суммирование узкополосных альbedo для получения относительно широкополосного альbedo [13], подобно тому, что осуществлялось для спутниковых измерений [14]. Настоящая статья посвящена анализу и оптимизации второго вышеуказанного этапа формирования оценок узкополосных альbedo.

Материалы и методы

Как сообщается в работе [15], идеальное устройство, измеряющее альbedo, должно учесть зенитный угол положения БПЛА относительно исследуемой точки. Если учесть, что зенитный

угол своим изменением существенно влияет на выходные показатели мультиспектрометра (рис.1) и такое влияние отражается на значениях DN , выдаваемых спектрометрами, в качестве необработанных данных, то уравнение (1) в случае линеаризации кривой, показанной на рис. 1, может быть представлено в виде

$$Z = \left(1 - \frac{\beta}{\beta_0}\right) \cdot a [\ln(x+1)]^b, \quad (2)$$

где β – текущий зенитный угол; β_0 – максимальная величина β . С учетом выражения (2) задача исследования формулируется следующим образом: следует определить тип зависимости $x = x(\beta)$, при которой суммарная величина Z могла бы достичь экстремума.

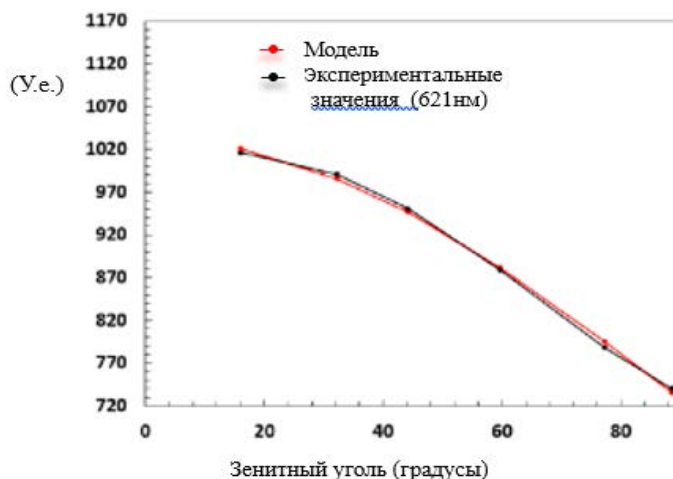


Рис. 1. Зависимость показаний мультиспектрометра (в условных единицах) в зависимости от зенитного угла на длине волны 621 нм [15]

Для решения данной задачи анализируются следующие показатели:

– функциональная зависимость показания спектрометра от угла зенита позиции БПЛА относительно исследуемой точки на поверхности Земли

$$X = X(\beta); \quad (1)$$

– функционал оптимизации в виде

$$F_1 = \int_0^{\beta_0} \left(1 - \frac{\beta}{\beta_0}\right) a [\ln(x(\beta)+1)]^b; \quad (3)$$

– ограничительное условие, задаваемое на вновь введенную функцию $x(\beta)$ в виде

$$\int_0^{\beta_0} x(\beta) d\beta = C. \quad (4)$$

Физический смысл ограничения (4) заключается в интегральной однородности рассматриваемого поля в отношении его оптических показателей в направлении сканирования поля. Функционал цели сформируем следующим образом:

– введя новый показатель Z_1 , выражение (2) перепишем в виде

$$Z_1 = \sqrt[b]{\frac{Z}{a}} = \sqrt[b]{1 - \left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)} \ln(x+1); \quad (5)$$

– с учетом выражения (5) функционал цели имеет вид

$$F_2 = \int_0^{\beta_{\max}} Z_1 d\beta = \int_0^{\beta_{\max}} \sqrt[b]{1 - \frac{\beta}{\beta_0}} \ln[x(\beta)+1] d\beta. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом выражений (4) и (6) можно составить задачу безусловной вариационной оптимизации целевого функционала, который приобретает следующий вид:

$$F_3 = \int_0^{\beta_0} \sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}] \cdot \ln[x(\beta)+1] d\beta + \lambda \left[\int_0^{\beta_0} x(\beta) d\beta - C \right]. \quad (7)$$

Решение задачи (7) в соответствии с работой [16] должно удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ \sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}] \ln[x(\beta)+1] + \lambda x(\beta) \right\}}{dx(\beta)} = 0. \quad (8)$$

Из условия (8) получаем

$$\sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}] \frac{1}{x(\beta)+1} + \lambda = 0. \quad (9)$$

Из выражение (9), вводя обозначение

$$\phi(\beta) = \sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}], \quad (10)$$

запишем

$$\frac{\phi(\beta)}{x(\beta)+1} = \lambda. \quad (11)$$

Из выражения (11) находим

$$x(\beta) = - \left(1 + \frac{\phi(\beta)}{\lambda} \right). \quad (12)$$

С учетом выражений (4) и (12) получим

$$- \int_0^{\beta_0} \left(1 + \frac{\phi(\beta)}{\lambda} \right) d\beta = C. \quad (13)$$

Из выражения (13) находим

$$\lambda = \frac{- \int_0^{\beta_0} \phi(\beta) d\beta}{C + \beta_0}. \quad (14)$$

Из выражений (11) и (14) получим

$$x(\beta) = \frac{\phi(\beta)(C + \beta_0)}{\int_0^{\beta_0} \phi(\beta) d\beta} - 1. \quad (15)$$

Выражение (15) перепишем в виде

$$x(\beta) = \phi(\beta) \cdot C_1 - 1, \quad (16)$$

где

$$C_1 = \frac{(C + \beta_0)}{\int_0^{\beta_0} \phi(\beta) d\phi} = \frac{C_1 + \beta_0}{\int_0^{\beta_0} \sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}] d\beta}. \quad (17)$$

При решении (16), (17) функционал (7) достигает максимума, так как производная выражения (9) по искомой функции оказывается всегда отрицательной величиной. Далее рассмотрим вопрос об изменении DN в оптимальном режиме. С учетом выражений (5) и (16) получим

$$Z_1 = \sqrt[b]{1 - \frac{\beta}{\beta_0}} \cdot \ln \left[C_1 \cdot \sqrt[b]{1 - \frac{\beta}{\beta_0}} \right]. \quad (18)$$

С учетом выражений (5) и (18) получим

$$\sqrt[b]{\frac{Z}{a}} = \sqrt[b]{1 - \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)} \cdot \ln \left[C_1 \sqrt[b]{1 - \frac{\beta}{\beta_0}} \right]. \quad (19)$$

Из выражения (19) находим

$$Z = a \cdot \left[1 - \frac{\beta}{\beta_0} \right] \cdot \left[\ln \left(C_1 \sqrt[b]{1 - \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)} \right) \right]^b. \quad (20)$$

При нулевом зенитном угле получим

$$Z = a \left[\ln(C_1) \right]^b. \quad (21)$$

Как видно из выражения (17), с увеличением b растет и значение C_1 . При этом однозначно растет и Z .

Следовательно, при прочих равных условиях Z достигнет максимальной величины в том случае, если b имеет наивысшее значение.

Для подтверждения указанного заключения были проанализированы данные зависимости Z от значений x , приведенные в работе [13].

В табл. 1 приведены значения показателей Z , b при $x = 0,4$, извлеченные из вышеуказанных данных, приведенных в работе [13].

Таблица 1

Значения показателей Z и b

Показатели	Z	b
2a	165	0,2953
2b	165	0,2982
2c	170	0,3203
2d	160	0,2815
2e	160	0,2850
2f	165	0,2963

Как видно из данных, приведенных на табл. 1, наивысшие значения Z достигаются при максимальной величине b , что подтверждает результаты проведенной оптимизации.

Обсуждение

Сформирована и решена задача оптимизации альбедометрических измерений с применением мультиспектрометра, установленного на БПЛА. Учтено наличие логарифмической связи между необработанными DN -данными и реальным показателем отражения земных объектов в красном, зеленом и синем спектральных диапазонах. Также учитывается смоделированная линейно спадающая характеристика зависимости показания мультиспектрометра от зенитного угла. Объектом поиска является оптимальная зависимость показателя отражения земных объектов от зенитного угла позиции БПЛА относительно исследуемой точки на поверхности Земли. При указанной оптимальной зависимости целевой функционал в виде интегрированной величины DN по всему диапазону изменения зенитного угла должен достичь максимума с учетом некоторого ограничительного условия, наложенного на данную зависимость. С применением вариационного метода оптимизации вычислен оптимальный вид указанной зависимости.

Показано, что результаты проведенной оптимизации косвенно подтверждаются данными известных экспериментальных исследований.

Заключение

Проведена оптимизация альбедометрических измерений на узкополосном спектральном канале с учетом зависимости выходного показателя мультиспектрометра от угла позиции БПЛА относительно исследуемой точки на поверхности Земли.

Определен оптимальный вид зависимости реального показателя отражения земных объектов от зенитного угла угла сканирования.

Результаты проведенной оптимизации косвенно подтверждаются результатами известных экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo // *Algorithms. Remote Sens. Environ.* 2001. Vol. 76. P. 213–238.
2. Hock R. Glacier melt: A review of processes and their modelling // *Prog. Phys. Geogr.* 2005. Vol. 29. P. 362–391.
3. Jin Y., Schaaf C. B., Gao F. [et al.]. How does snow impact the albedo of vegetated land surfaces as analyzed with MODIS data? // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29. P. 1374–1384.
4. Myhre G., Kvilevåg M. M., Schaaf C. B. Radiative forcing due to anthropogenic vegetation change based on MODIS surface albedo data // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29. P. 1374.
5. Jin Y., Randerson J. T., Goetz S. J. [et al.]. The influence of burn severity on postfire vegetation recovery and albedo change during early succession in North American boreal forests // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2012. Vol. 117. G01036.
6. Cescatti A., Marcolla B., Vannan S. K. [et al.]. Intercomparison of MODIS albedo retrievals and in situ measurements across the global FLUXNET network // *Remote Sens. Environ.* 2012. Vol. 121. P. 323–334.
7. Fernandes T., Perez J. L., Cardenal J. [et al.]. Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques // *Remote Sens.* 2016. Vol. 8, 8AP.37.
8. Saari H., Pellikka I., Pesonen L. [et al.]. Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications // *Proc. SPIE.* 2011. Vol. 8174. P. 466–471.
9. Johnson L. F., Herwitz S., Dunagan S. [et al.]. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV // *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment.* Beijing, 2003. Vol. 2–3. P. 22–26.
10. Berni J. A. J., Suarez L., Fereres E. Remote Sensing of Vegetation from UAV Platforms Using Lightweight Multispectral and Thermal Imaging Sensors. URL: <http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/1.4.7-W5/paper/Jimenes.Berni-155.pdf> (accessed on 21 March 2016).
11. Zahavi R. A., Dandois J. P., Holl K. D. [et al.]. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery // *Biol. Conserv.* 2015. Vol. 186. P. 287–295.
12. Ryan J., Hubbard A., Box J. E. [et al.]. Derivation of High Spatial Resolution Albedo from UAV Digital Imagery: Application over the Greenland Ice Sheet // *Front. Earth Sci.* 2017. Vol. 5. doi: 10.3389/feart.2017.00040
13. Liang Sh., Shuey Ch. J., Russ A. L. [et al.]. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation // *Remote sensing of environment.* 2009. Vol. 84. P. 25–41. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00068-8
14. Boehmle J. M., Loria-Salazar S. M., Stevens C. [et al.]. Development of a Multispectral Albedometer and Deployment on an Unmanned Aircraft for Evaluating Satellite Retrieved Surface Reflectance over Nevada's Black Rock Desert // *Sensors.* 2018. doi:10.3390/s18103504
15. Эльсгольд Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. : Наука, 1974. 472 с.

References

1. Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo. *Algorithms. Remote Sens. Environ.* 2001;76:213–238.
2. Hock R. Glacier melt: A review of processes and their modelling. *Prog. Phys. Geogr.* 2005;29:362–391.
3. Jin Y., Schaaf C.B., Gao F. et al. How does snow impact the albedo of vegetated land surfaces as analyzed with MODIS data? *Geophys. Res. Lett.* 2002;29:1374–1384.
4. Myhre G., Kvilevåg M.M., Schaaf C.B. Radiative forcing due to anthropogenic vegetation change based on MODIS surface albedo data. *Geophys. Res. Lett.* 2002;29:1374.
5. Jin Y., Randerson J.T., Goetz S.J. et al. The influence of burn severity on postfire vegetation recovery and albedo change during early succession in North American boreal forests. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2012;117:G01036.

6. Cescatti A., Marcolla B., Vannan S.K. et al. Intercomparison of MODIS albedo retrievals and in situ measurements across the global FLUXNET network. *Remote Sens. Environ.* 2012;121:323–334.
7. Fernandes T., Perez J.L., Cardenal J. et al. Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques. *Remote Sens.* 2016;8:8AP.37.
8. Saari H., Pellikka I., Pesonen L. et al. Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications. *Proc. SPIE.* 2011;8174:466–471.
9. Johnson L.F., Herwitz S., Dunagan S. et al. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment.* Beijing, 2003;2–3:22–26.
10. Berni J.A.J., Suarez L., Fereres E. *Remote Sensing of Vegetation from UAV Platforms Using Lightweight Multispektral and Thermal Imaging Sensors.* Available at: <http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/1-4-7-W5/paper/Jimenes-Berni-155.pdf> (accessed on 21 March 2016).
11. Zahavi R.A., Dandois J.P., Holl K.D. et al. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biol. Conserv.* 2015;186:287–295.
12. Ryan J., Hubbard A., Box J.E. et al. Derivation of High Spatial Resolution Albedo from UAV Digital Imagery: Application over the Greenland Ice Sheet. *Front. Earth Sci.* 2017;5. doi: 10.3389/feart.2017.00040
13. Liang Sh., Shuey Ch.J., Russ A.L. et al. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. *Remote sensing of environment.* 2009;84:25–41. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00068-8
14. Boehmler J.M., Loria-Salazar S.M., Stevens C. et al. Development of a Multispektral Albedometer and Deployment on an Unmanned Aircraft for Evaluating Satellite Retrieved Surface Reflectance over Nevada's Black Rock Desert. *Sensors.* 2018. doi:10.3390/s18103504
15. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie = Differential equations and calculus of variations.* Moscow: Nauka, 1974:472. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Амида Джабраиль гызы Алиева

кандидат технических наук, главный специалист,
ученый секретарь,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: amidec.b@mail.ru

Amida Jabrail gizi Alieva

Candidate of technical sciences, chief specialist,
scientific secretary,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Хумар Сабир гызы Алиева

кандидат технических наук, доцент,
главный научный сотрудник НИИ
Аэрокосмической информатики,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: a.xumar555@mail.ru

Khumar Sabir gizi Alieva

Candidate of technical sciences, associate professor,
head scientific researcher of Research Institute
of Aerospace Informatics,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Мурад Горхмяз оглы Ашрафов

докторант,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: esrefov9955@gmail.com

Murad Gorkhmaz oglu Ashrafov

Doctoral student,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Наира Хансувар гызы Мустафазаде

кандидат технических наук, ученый секретарь,
Институт космических исследований
природных ресурсов,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: nm_609@mail.ru

Naira Khansuvar gizi Mustafazade

Candidate of technical sciences, scientific secretary,
Institute for Space Research,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

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

Поступила в редакцию/Received 11.07.2024

Поступила после рецензирования/Revised 06.08.2024

Принята к публикации/Accepted 02.09.2024

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 681.2.084

doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ В ВИДЕ ГОФРИРОВАННОЙ КРЕМНИЕВОЙ МЕМБРАНЫ

В. С. Волков¹, С. Н. Базыкин², В. А. Бардин³, К. С. Самохина⁴, Н. В. Волкова⁵

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

¹vadimv_1978@mail.ru, ²cbazykin@yandex.ru, ³vit-bardin@yandex.ru,

⁴Kristina.bazykina@mail.ru, ⁵balikovan@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Выполнено исследование чувствительного элемента емкостного датчика давления в виде кремниевой гофрированной мембраны. *Материалы и методы.* С использованием конечно-элементного моделирования определены параметры гофра, позволяющие вдвое увеличить чувствительность по сравнению с плоской мембраной, имеющей аналогичные габаритные размеры. *Результаты и выводы.* Показано, что наличие краевого гофра с прямоугольным профилем позволяет повысить чувствительность мембраны.

Ключевые слова: полупроводниковая мембрана, чувствительный элемент, гофр, механическое напряжение, прогиб, чувствительность

Для цитирования: Волков В. С., Базыкин С. Н., Бардин В. А., Самохина К. С., Волкова Н. В. Моделирование чувствительного элемента датчика давления в виде гофрированной кремниевой мембраны // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 76–83. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-9

SIMULATION OF A PRESSURE SENSOR SENSING ELEMENT BASED ON A CORRUGATED SILICON MEMBRANE

V.S. Volkov¹, S.N. Bazykin², V.A. Bardin³, K.S. Samohina⁴, N.V. Volkova⁵

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

¹vadimv_1978@mail.ru, ²cbazykin@yandex.ru, ³vit-bardin@yandex.ru,

⁴Kristina.bazykina@mail.ru, ⁵balikovan@mail.ru

Abstract. *Background.* The paper investigates the sensing element of a capacitive pressure sensor based on a silicon corrugated membrane. *Materials and methods.* Using finite element modeling, the parameters of the corrugation were determined, which make it possible to double the sensitivity compared to a flat membrane having similar overall dimensions. *Results and conclusions.* It is shown that the presence of an edge corrugation with a rectangular profile makes it possible to increase the sensitivity of the membrane.

Keywords: semiconductor membrane, sensing element, corrugation, mechanical stress, deflection, sensitivity

For citation: Volkov V.S., Bazykin S.N., Bardin V.A., Samohina K.S., Volkova N.V. Simulation of a pressure sensor sensing element based on a corrugated silicon membrane. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):76–83. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-9

Введение

В современных конструкциях датчиков давления емкостного типа широко применяются упругие чувствительные элементы (ЧЭ) в виде мембран различной геометрической формы. Наиболее часто применяются плоские мембраны и мембраны с жестким центром, однако пределы возможностей по улучшению характеристик таких мембран (чувствительности, линейности) уже практически достигнуты. Вместе с тем развитие микромеханических технологий профилирования полупроводниковых структур сделало возможным изготовление гофрированных мембран из кремния. Технология глубокого травления кремния (в других источниках – травления с высоким аспектным соотношением) позволяет изготавливать кремниевые мембраны с гофром прямоугольного профиля [1–3].

Еще во второй половине прошлого века были предложены и исследованы конструкции металлических гофрированных мембран, отличающиеся повышенной линейностью и чувствительностью [4–6]. Однако расчет таких мембран выполнялся приближенным графоаналитическим методом, кроме того, такие мембраны изготавливались из изотропных сплавов и имели, как правило, пильчатый или синусоидальный гофр. Все это не позволяет использовать известные методики для расчета характеристик кремниевых мембран с гофром прямоугольной формы. Задачу расчета характеристик таких мембран можно решить численным моделированием методом конечных элементов с помощью специального программного обеспечения.

В последние десятилетия отечественными учеными ведутся исследования в области улучшения характеристик полупроводниковых мембран. Для мембран, используемых в качестве ЧЭ емкостных датчиков (реализующих преобразование давления в прогиб) предложено оценивать чувствительность преобразования как отношение прогиба центра мембраны к приложенному давлению [7–8]

$$Sm = \frac{y(0)}{p} = \frac{a^2}{4\sigma h},$$

где $y(0)$ – прогиб центра мембраны; p – приложенное давление; a – радиус мембраны; σ – механическое напряжение; h – толщина мембраны.

При этом для повышения чувствительности предлагается снижение механических напряжений за счет формирования структуры гофров по периферии гибкой части мембраны (рис. 1), что позволит обеспечить резкое снижение уровня остаточных напряжений в центральной области мембраны за счет изгибной деформации в области гофра.

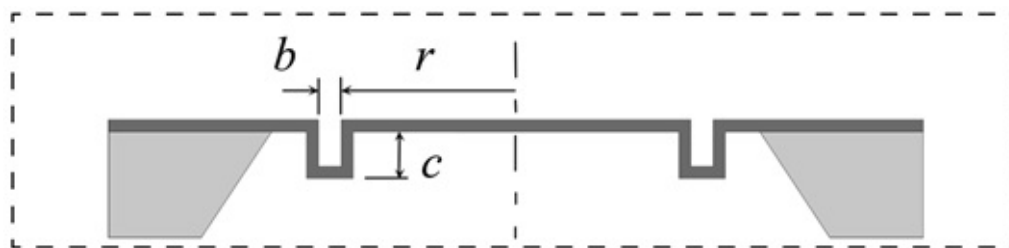


Рис. 1. Геометрические параметры гофрированной мембраны

В работе [7] предлагается оценивать прогиб мембраны на основе выражений, полученных для плоских мембран из изотропного материала, что представляется не вполне корректным. Гораздо точнее оценить влияние параметров гофра на характеристики мембраны можно с помощью специального программного обеспечения, моделирующего напряженно-деформированное состояние методом конечных элементов. Данная статья посвящена оценке влияния гофра на прогиб центра мембраны по результатам моделирования гофрированной мембраны в программе SolidWorks.

Анализ литературных источников, посвященных проектированию и конструированию мембранных чувствительных элементов датчиков давления тензорезисторного и емкостного типа, показывает, что исследователями получены аналитические зависимости, описывающие только плоские мембраны и мембраны с жестким центром [5, 6, 8]. Кроме того, данные зависимости получены для металлических мембран, металлы и сплавы которых являются изотропными материалами. В то же время при разработке конструкций ЧЭ на основе кремния

приходится учитывать анизотропию механических свойств, что делает применение формул и методик, разработанных для металлических мембран, слишком грубыми. Альтернативным способом является использование САПР инженерного анализа, например SolidWorks, имеющих модули для моделирования напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов.

В данной работе исследуется возможность увеличения чувствительности гофрированных кремниевых мембран по сравнению с плоскими мембранами одинакового диаметра.

Материалы и методы

Для проведения моделирования предварительно создается трехмерная модель ЧЭ непосредственно в SolidWorks. На рис. 2 показан эскиз половины сечения плоской мембраны (радиус рабочей части 2 мм, толщина 100 мкм), на рис. 3 – трехмерная модель, созданная в SolidWorks на основе этого эскиза.

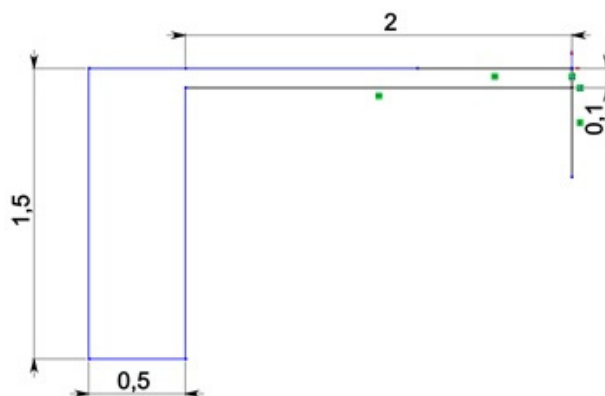


Рис. 2. Эскиз мембраны с плоским ЧЭ

Для исследования напряженно-деформированного состояния мембраны под действием приложенного давления использовался встроенный в SolidWorks модуль «Simulation» и входящий в его состав раздел «Статический анализ». Он позволяет задать материал мембраны (кремний монокристаллический), указать крепления (жесткая заделка по нижней плоскости основания), направление и величину давления (0,6 МПа на верхнюю плоскость мембраны), а также задать параметры сетки и параметры отображения результатов.

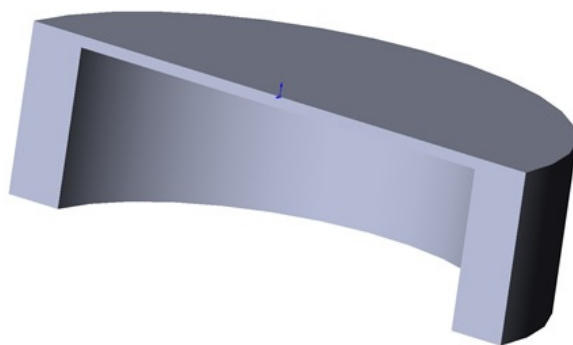


Рис. 3. 3D-модель мембраны с плоским ЧЭ № 1

Давление, подаваемое на верхнюю поверхность мембраны, составляет 0,6 МПа. Во вкладке «Крепления» установлена фиксация по нижнему торцу модели.

Результаты моделирования представлены на рис. 4, 5. На рис. 4 показано распределение напряжений по Мизесу в мембране, данное напряжение используется для оценки прочности под действием измеряемого давления. Максимальное значение напряжения по Мизесу, как известно, наблюдается в области мембраны, примыкающей к жесткой заделке, и составляет 161 МПа, что значительно меньше 400 МПа (значения, которые рекомендуется брать для кремниевых ЧЭ). На рис. 5 показан прогиб мембраны, максимальное значение которого равно $1,67 \cdot 10^{-6}$ м, или 16,7 мкм.

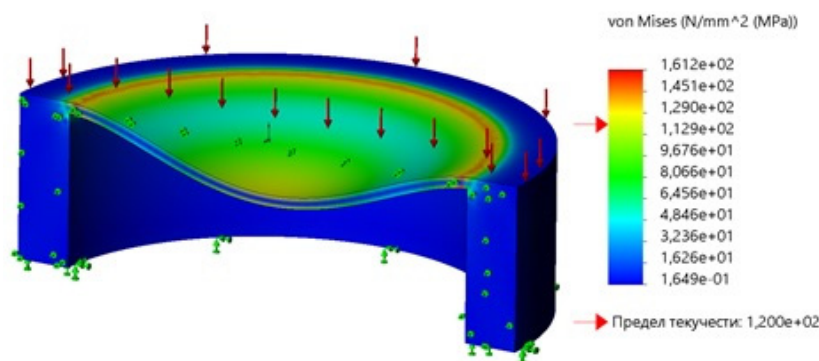


Рис. 4. Распределение напряжений по Мизесу в плоском ЧЭ № 1

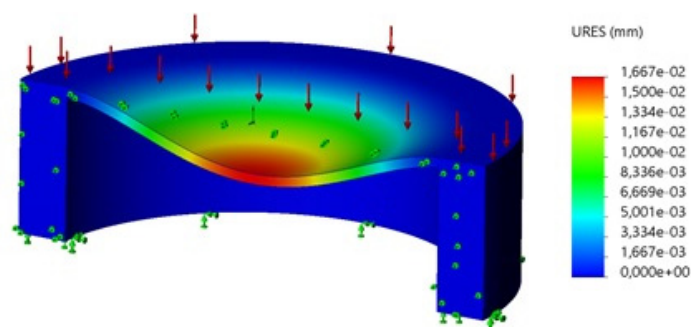


Рис. 5. Прогиб плоского ЧЭ № 1

Для исследования влияния краевого гофра на прогиб мембраны были созданы и исследованы в программе SolidWorks 3D-модели гофрированных мембран с различными параметрами гофра.

На рис. 6 представлена 3D-модель гофрированной мембраны, имеющая следующие параметры гофра: ширина гофра – 30 мкм, глубина – 250 мкм.

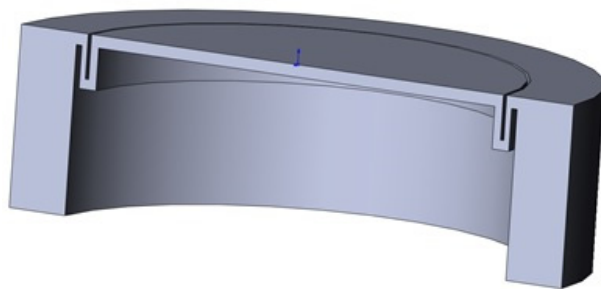


Рис. 6. 3D-модель гофрированной мембраны № 2

Для модели № 2 выполнялся статический анализ с теми же параметрами, что и для плоской мембраны модели № 1. Результат моделирования представлен на рис. 7.

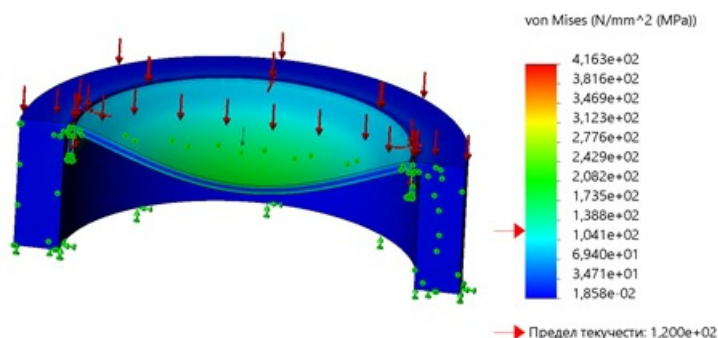


Рис. 7. Распределение напряжений по Мизесу мембраны № 2 с глубиной гофра 250 мкм и шириной 30 мкм

Максимальное напряжение по Мизесу мембраны № 2 составило 416 МПа, что превышает рекомендуемый предел прочности 400 МПа.

Затем была создана модель № 3 с шириной гофра 100 мкм и глубиной 250 мкм (рис. 8).

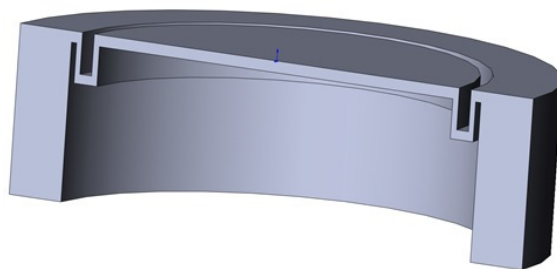


Рис. 8. 3D-модель гофрированной мембраны № 3 с шириной гофра 100 мкм и глубиной 250 мкм

Результат моделирования мембраны № 3 представлен на рис. 9.

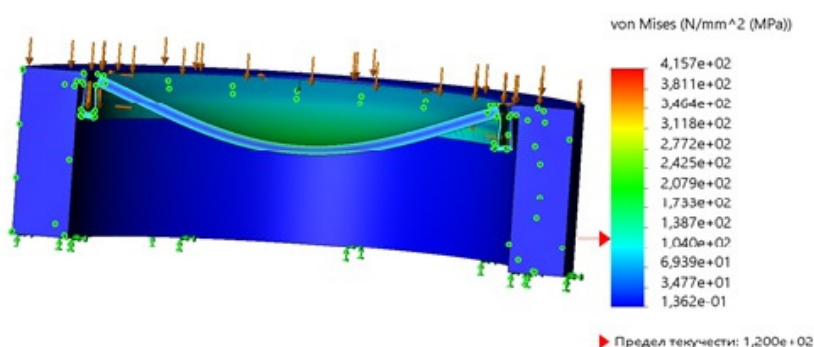


Рис. 9. Распределение напряжений по Мизесу мембраны № 3 с шириной гофра 100 мкм и глубиной 250 мкм

На рисунке видно, что максимальное значение напряжения по Мизесу так же, как и для предыдущей модели, составило 415,7 МПа.

Далее была создана модель № 4 с шириной гофра 50 мкм и глубиной гофра 200 мкм (рис. 10).

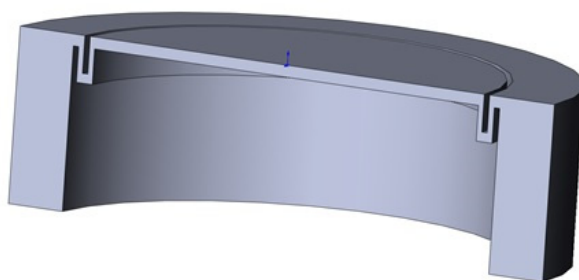


Рис. 10. 3D-модель гофрированной мембраны № 4 с шириной гофра 50 мкм и глубиной 200 мкм

Результат моделирования мембраны № 4 представлен на рис. 11.

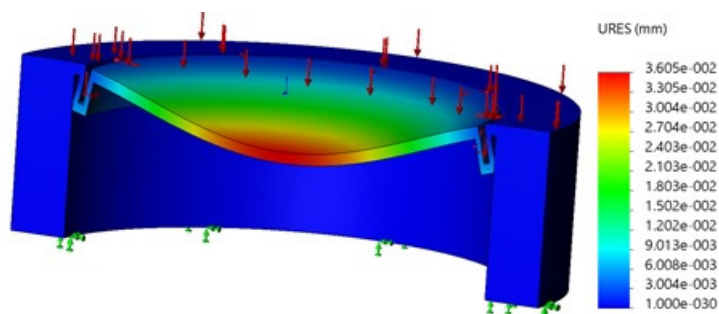


Рис. 11. Распределение напряжений по Мизесу мембраны № 4 с шириной гофра 50 мкм и глубиной 200 мкм

Анализ рис. 11 показывает, что максимальное значение напряжения по Мизесу составляет 363,7 МПа, что соответствует критерию прочности кремниевой мембраны.

После этого был исследован прогиб мембраны № 4, результат представлен на рис. 12. Из рис. 12 видно, что максимальный прогиб составляет 29,5 мкм, что почти вдвое превосходит прогиб плоской мембраны аналогичного диаметра (см. рис. 5).

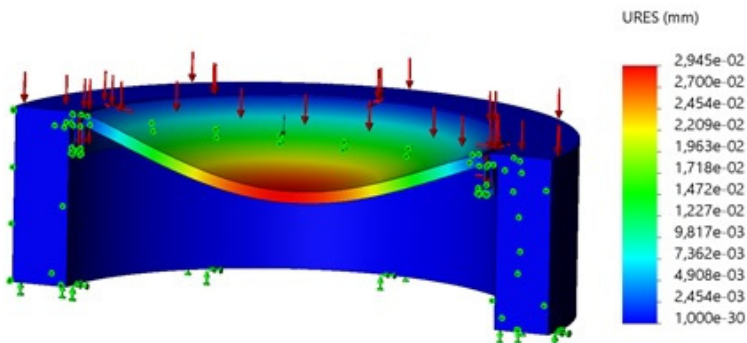


Рис. 12. Прогиб мембраны № 4 с шириной гофра 50 мкм и глубиной 200 мкм

Таким образом, применение метода конечных элементов позволило определить оптимальные параметры гофра кремниевой мембраны, позволяющие почти вдвое повысить ее чувствительность при сохранении механической прочности и габаритных размеров. Отношение глубины гофра к ширине 2,5:1 позволяет получить прогиб, соизмеримый с прогибом плоской мембраны, отношение глубины гофра к ширине 4:1 позволяет получить прогиб почти вдвое больший, чем у плоской мембраны. Задачей дальнейшего исследования является определение влияния геометрических параметров гофра на линейность функции преобразования давления в прогиб мембраны.

Заключение

В статье рассмотрены возможности применения гофрированных кремниевых мембран в качестве ЧЭ емкостных датчиков давления, проведено исследование влияния краевого гофра на чувствительность мембраны. Показано, что использование гофрированных кремниевых мембран позволяет значительно повысить чувствительность ЧЭ, не снижая при этом механической прочности мембраны.

Список литературы

1. Амиров И. И., Морозов О. В., Изюмов М. О. [и др.]. Плазмохимическое травление глубоких канавок в кремнии с высоким аспектным отношением для создания элементов микромеханики // Микросистемная техника. 2004. № 12. С. 15–18.
2. Долгополов В. М., Одинокое В. В., Иракин П. А. [и др.]. Новое оборудование для травления кремниевых структур на пластинах диаметром до 200 мм // Наноиндустрия. 2019. № 5. С. 268–275.
3. Гусева О. С., Козлов Д. В., Корпухин А. С. [и др.]. Технологии групповой микрообработки для производства чувствительных элементов инерциальных МЭМС-датчиков // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8, № 4. С. 86–97.
4. Калинин М. Е., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л., Комарова А. В. Микроэлектромеханические системы и датчики. СПб.: Университет ИТМО, 2020. 75 с.
5. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
6. Антонец И. В., Терешенок А. П. Методы расчета и моделирования упругих элементов: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 121 с.
7. Ветров А. А., Корляков А. В., Сергушичев А. Н., Сергушичев К. А. Расчет и измерения динамических параметров наноразмерных колебаний мембранных элементов // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 12. С. 48–55.
8. Gavryushin S. S., Skvortsov P. A., Skvortsov A. Numerical modeling and optimization of the design of the corrugated pressure sensor membrane // Periodico Tche Quimica. 2018. P. 174–181.

References

1. Amirov I.I., Morozov O.V., Izyumov M.O. et al. Plasmochemical etching of deep grooves in silicon with a high aspect ratio for creating elements of micromechanics. *Mikrosistemnaya tekhnika = Microsystem engineering*. 2004;(12):15–18. (In Russ.)
2. Dolgoplov V.M., Odinkov V.V., Irakin P.A. et al. New equipment for etching silicon structures on wafers up to 200 mm in diameter. *Nanoindustrialiya = Nanoindustry*. 2019;(5):268–275. (In Russ.)
3. Guseva O.S., Kozlov D.V., Korpukhin A.S. et al. Technologies of group microprocessing for the production of sensitive elements of inertial MEMS sensors. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy = Rocket and space instrumentation and information systems*. 2021;8(4):86–97. (In Russ.)
4. Kalinkina M.E., Pirozhnikova O.I., Tklich V.L., Komarova A.V. *Mikroelektromekhanicheskie sistemy i datchiki = Microelectromechanical systems and sensors*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2020:75. (In Russ.)
5. Ponomarev S.D., Andreeva L.E. *Raschet uprugikh elementov mashin i priborov = Calculation of elastic elements of machines and devices*. Moscow: Mashinostroenie, 1980:326. (In Russ.)
6. Antonets I.V., Tereshenok A.P. *Metody rascheta i modelirovaniya uprugikh elementov: ucheb. posobie = Methods of calculation and modeling of elastic elements : a textbook*. Ul'yanovsk: UIGTU, 2013:121. (In Russ.)
7. Vetpov A.A., Kopyakov A.V., Seggushichev A.N., Seggushichev K.A. Calculation and measurement of dynamic parameters of nanoscale vibrations of membrane elements. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering*. 2012;(12):48–55. (In Russ.)
8. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A., Skvortsov A. Numerical modeling and optimization of the design of the corrugated pressure sensor membrane. *Periodico Tche Quimica*. 2018:174–181.

Информация об авторах / Information about the authors

Вадим Сергеевич Волков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vadimv_1978@mail.ru

Vadim S. Volkov

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

Сергей Николаевич Базыкин

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cbazykin@yandex.ru

Sergey N. Bazykin

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Вита́лий Анато́льевич Бардин

кандидат технических наук,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vit-bardin@yandex.ru

Vitaliy A. Bardin

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

Кристина Сергеевна Самохина

кандидат технических наук,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Kristina.bazykina@mail.ru

Kristina S. Samokhina

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

Ната́лия Вале́нтиновна Волкова

кандидат биологических наук, доцент, заведующий
кафедрой химии и методики обучения химии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: balikovan@mail.ru

Nataliya V. Volkova

Candidate of biological sciences, associate professor,
head of the sub-department of chemistry
and methods of teaching chemistry,
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 03.09.2024

Поступила после рецензирования/Revised 02.10.2024

Принята к публикации/Accepted 01.11.2024

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

А. В. Светлов¹, А. С. Колдов²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разработка и исследование амплитудного детектора с малой погрешностью преобразования амплитуды синусоидального напряжения в постоянное напряжение. *Материалы и методы.* Исследуется амплитудный детектор, реализующий метод неявных вычислений среднеквадратичных значений переменного напряжения. *Результаты.* Приведены структурная схема амплитудного детектора, методика и результаты его экспериментальных исследований. В диапазоне амплитуд синусоидального напряжения от 5 до 10 В и частот от 100 Гц до 1 МГц относительная погрешность преобразования среднеквадратичного значения напряжения не более $\pm 2\%$, а относительная погрешность преобразования амплитуды напряжения – не более $\pm 1,5\%$. *Выводы.* Подтверждена возможность применения амплитудного детектора, реализующего метод неявных вычислений среднеквадратичных значений переменного напряжения, для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей.

Ключевые слова: исследование, амплитудный детектор, синусоидальное напряжение

Для цитирования: Светлов А. В., Колдов А. С. Исследование амплитудного детектора для измерителей параметров резонансных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 84–91. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-10

INVESTIGATION OF AN AMPLITUDE DETECTOR FOR RESONANT ELECTRICAL CIRCUIT PARAMETER METERS

A.V. Svetlov¹, A.S. Koldov²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the study is to develop and investigate a minor-error amplitude detector for converting the amplitude of a sine wave voltage into the direct current voltage. *Materials and methods.* The implicit method for calculating the root mean square (rms) values of alternating voltage has been implemented to investigate the amplitude detector. *Results.* A block diagram for the amplitude detector along with the research methodology and outcomes are presented. Provided the sinusoidal voltage waveform is with 5 V to 10 V amplitude and 100 Hz to 1 MHz frequency, the relative error in converting the rms voltage value falls short of $\pm 2\%$, and the relative error in converting the voltage amplitude being $\pm 1.5\%$. *Conclusions.* The feasibility of using an amplitude detector that implements the implicit method for calculating the rms values of alternating voltage to develop means for measuring resonant electrical circuit parameters has been substantiated.

Keywords: investigation, amplitude detector, sinusoidal voltage

For citation: Svetlov A.V., Koldov A.S. Investigation of an amplitude detector for resonant electrical circuit parameter meters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):84–91. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-10

Введение

Для определения параметров резонансных электрических цепей их включают в состав специально создаваемых измерительных цепей, на вход которых подают тестовые синусоидальные сигналы. Перестраивая частоту тестового сигнала, находят резонансные частоты исследуемой

цепи и значения амплитуды выходного синусоидального напряжения измерительной цепи в особых точках ее амплитудно-частотной характеристики для определения добротности и эквивалентных электрических параметров исследуемой цепи в соответствии с принятой для измерения эквивалентной электрической схемой цепи [1]. Погрешность, с которой амплитудным детектором (АД) определяются значения амплитуды выходного синусоидального напряжения измерительной цепи, непосредственно влияет на погрешность определения параметров резонансных электрических цепей. Поэтому важной и актуальной является задача разработки и исследования АД, обладающих малой погрешностью преобразования амплитуды синусоидального напряжения в постоянное напряжение.

Структурная схема амплитудного детектора для измерителей параметров резонансных электрических цепей

АД, входящие в состав измерительных установок для определения параметров резонансных электрических цепей, должны обеспечивать преобразование в постоянное напряжение амплитуды выходного синусоидального напряжения измерительных цепей в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц и в диапазоне амплитуд до 10 В. Относительная погрешность не должна превышать 1–2 % [1].

В работе [2] была предпринята попытка решить такую задачу путем прямого измерения амплитуды синусоидального напряжения с помощью пикового детектора. Была получена относительная погрешность не более ± 1 % в диапазоне частот синусоидального напряжения от 20 до 200 кГц при амплитуде от 5,0 до 10,0 В. Кроме недостаточной ширины рабочей полосы частот для АД на основе пиковых детекторов характерны низкая помехозащищенность и низкое быстродействие.

В данной работе исследуется АД, основанный на измерении среднеквадратичного значения синусоидального напряжения с последующим умножением на коэффициент амплитуды (пик-фактор) $k_a = \sqrt{2} \approx 1,414$. При этом предполагается, что измерительная цепь, преобразующая сопротивление резонансной электрической цепи в напряжение, работает в линейном режиме, не искажая синусоидальной формы напряжения.

Среднеквадратичное значение входного напряжения $u(t)$ описывается выражением

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (1)$$

Непосредственное вычисление среднеквадратичного значения напряжения по формуле (1) с последовательным возведением в квадрат текущего значения входного напряжения, усреднением и извлечением квадратного корня из полученного результата не может обеспечить широкий динамический диапазон измерений при сохранении допустимых погрешностей.

От этого недостатка свободен альтернативный, неявный метод вычисления среднеквадратичного значения напряжения [3, 4], в основе которого лежат следующие соображения.

При возведении в квадрат частей уравнения (1) получается

$$U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt. \quad (2)$$

Интеграл в правой части формулы (2) можно рассматривать как текущее среднее значение квадрата входного напряжения:

$$\overline{u^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt. \quad (3)$$

Тогда уравнение (2) приобретает вид

$$U^2 = \overline{u^2(t)}. \quad (4)$$

Разделив обе части уравнения (4) на U , получим

$$U = \frac{\overline{u^2(t)}}{U}. \quad (5)$$

В соответствии с уравнением (5) осуществляется неявное вычисление среднеквадратичных значений U входного напряжения $u(t)$, а структура преобразователя среднеквадратичного значения (ПСКЗ) переменного напряжения в постоянное напряжение, основанного на методе неявных вычислений, по сути, представляет собой специализированную аналоговую вычислительную машину, которая решает уравнение (5) в непрерывном режиме.

С целью упрощения аппаратной реализации операции возведения в квадрат и деления сигналов выполняются с использованием логарифмического представления сигналов. Схема такого ПСКЗ приведена на рис. 1:

– прецизионный двухполупериодный выпрямитель находит абсолютное значение входного напряжения $|u(t)|$;

– операция возведения в квадрат выпрямленного входного напряжения заменена на удвоение логарифма этого сигнала: $\text{LOG } u^2(t) = 2 \text{ LOG } u(t)$;

– операция деления напряжений заменена на вычитание логарифма среднеквадратичного выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ из логарифма квадрата выпрямленного входного напряжения:

$$\text{LOG } \frac{u^2(t)}{U_{\text{ВЫХ}}} = 2 \text{ LOG } u(t) - \text{LOG } U_{\text{ВЫХ}};$$

– в экспоненциальном каскаде находится антилогарифм выходного сигнала предыдущего каскада $\frac{u^2(t)}{U_{\text{ВЫХ}}}$;

– фильтр вычисляет среднее значение выходного сигнала $\overline{\frac{u^2(t)}{U_{\text{ВЫХ}}}}$; выходное напряжение фильтра $U_{\text{ВЫХ}}$ равно искомому среднеквадратичному значению входного напряжения:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{\overline{u^2(t)}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \sqrt{\overline{u^2(t)}};$$

– цепь обратной связи находит логарифм выходного напряжения фильтра $\text{LOG } U_{\text{ВЫХ}}$ и подает этот сигнал на логарифмический вычитатель, замыкая контур обратной связи для непрерывного решения уравнения (5).

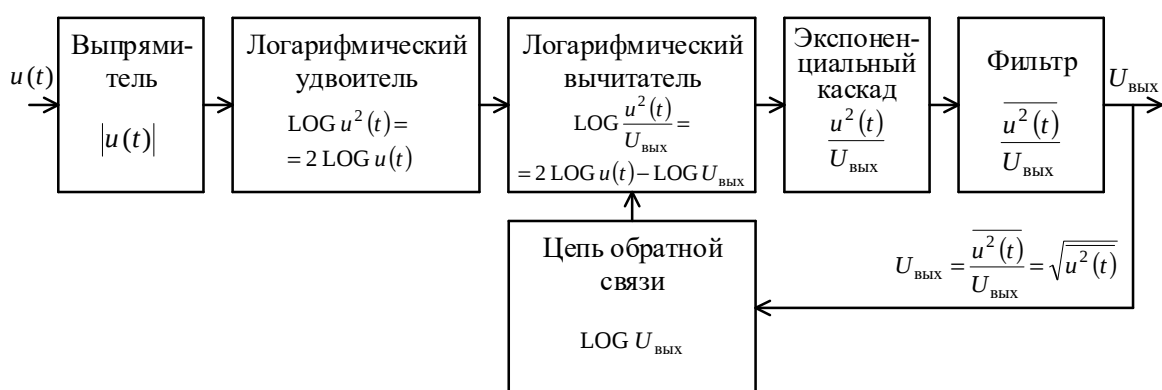


Рис. 1. Структурная схема ПСКЗ с логарифмической обратной связью

Среди серийно выпускаемых измерительных ПСКЗ напряжения с частотой до 1 МГц наиболее высокую точность преобразования обеспечивают микросхемы AD637 [5]. При построении АД для измерителей параметров резонансных электрических цепей авторами был использован модуль ПСКЗ переменного напряжения в постоянное напряжение на основе AD637 [6]. Структурная схема построенного АД для измерителей параметров резонансных электрических цепей приведена на рис. 2. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ модуля соответствует среднеквадратичному значению U входного напряжения. В состав модуля, кроме микросхемы AD637, входит

активный фильтр нижних частот (ФНЧ 1 на схеме АД рис. 2) с частотой среза $f_{\text{ср}} = 0,05$ Гц и временем установления 20 с, сглаживающий пульсации выходного напряжения ПСКЗ при работе на самых низких (ниже 100 Гц) частотах. С целью сглаживания пульсаций выходного напряжения ПСКЗ при работе на частотах выше 20 кГц применен дополнительный активный фильтр нижних частот (ФНЧ 2) второго порядка с частотой среза $f_{\text{ср}} = 2,0$ кГц и временем установления 5 мс, построенный по схеме Саллена – Ки [7–9]. Для получения выходного напряжения $U_{\text{вых ФНЧ2}}$, равного амплитуде U_m входного синусоидального напряжения установлен коэффициент усиления ФНЧ 2, равный $K = 1,414$. Предусмотрена коррекция аддитивной погрешности.

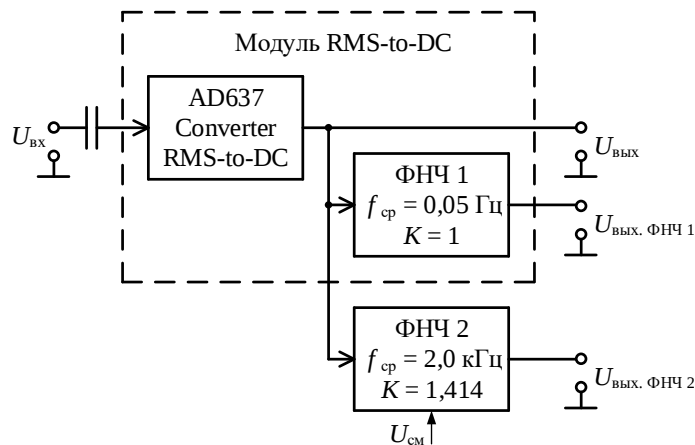


Рис. 2. Структурная схема АД для измерителей параметров резонансных электрических цепей

На рис. 3 приведены фотографии построенного авторами макета АД и измерительной части стенда для исследования АД.

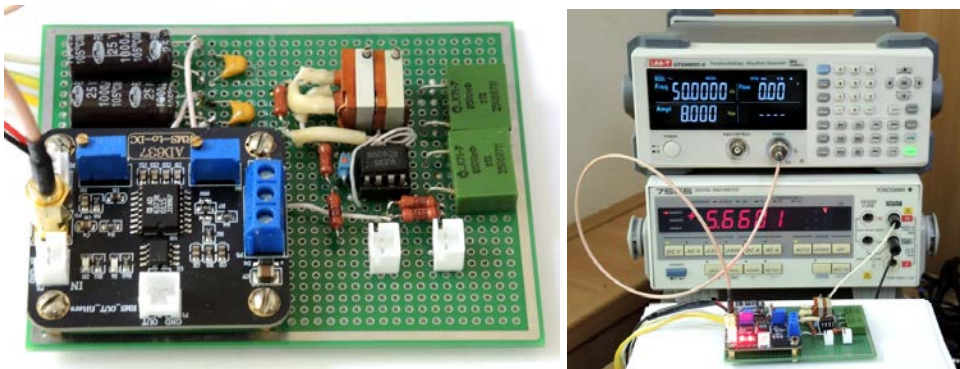


Рис. 3. Макет АД и измерительная часть стенда для исследования АД

Формирование синусоидальных тестовых сигналов осуществляется с помощью DDS генератора UNI-T UTG9002C-II [10] с разрешением по частоте 1 мкГц в диапазоне частот до 2 МГц, с разрешением по амплитуде 1 мВ. Генератор обеспечивает оперативное изменение частоты и амплитуды тестового сигнала. Для измерения постоянного выходного напряжения АД используется цифровой вольтметр YOKOGAWA 7555 [11].

Методика экспериментальных исследований амплитудного детектора

Разработана методика экспериментальных исследований АД для измерителей параметров резонансных электрических цепей, предусматривающая:

1. Измерение амплитудно-частотных характеристик АД:

1.1. На вход АД с выхода DDS генератора подается синусоидальное напряжение, частота f которого варьируется в диапазоне от 100 Гц до 1 МГц – по 10 значений частоты в пределах каждой декады; амплитуда U_m входного синусоидального напряжения задается равной: 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 В.

1.2. С помощью цифрового вольтметра измеряются постоянные напряжения $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вых ФНЧ2}}$ на выходах АД, равные среднеквадратичному значению U и амплитуде U_m входного напряжения.

1.3. По результатам измерений выходных напряжений АД при каждом значении амплитуды входного напряжения U_m на каждой частоте f определяются:

– относительная погрешность преобразования среднеквадратичного значения U входного напряжения в постоянное выходное напряжение $U_{\text{вых}}$:

$$\delta U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}} - U_m / \sqrt{2}}{U_m / \sqrt{2}} \cdot 100 \% ; \quad (6)$$

– относительная погрешность преобразования амплитуды входного напряжения U_m в постоянное выходное напряжение $U_{\text{вых ФНЧ2}}$:

$$\delta U_{m \text{ вых}} = \frac{U_{\text{вых ФНЧ2}} - U_m}{U_m} \cdot 100 \% . \quad (7)$$

1.4. Строятся графики зависимостей погрешностей $\delta U_{\text{вых}}$ и $\delta U_{m \text{ вых}}$ от частоты f при заданных значениях амплитуды U_m входного напряжения.

2. Измерение амплитудных характеристик АД:

2.1. На вход АД с выхода DDS генератора подается синусоидальное напряжение, амплитуда U_m которого варьируется в диапазоне от 100 мВ до 10 В – по 10 значений амплитуды в пределах каждой декады; частота входного напряжения задается равной: 10; 50; 100; 500 кГц; 1 МГц.

2.2. Измеряются напряжения $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вых ФНЧ2}}$ на выходах АД.

2.3. По формулам (6) и (7) рассчитываются относительные погрешности преобразования среднеквадратичного значения и амплитуды входного напряжения в постоянные выходные напряжения.

2.4. Строятся графики зависимостей погрешностей $\delta U_{\text{вых}}$ и $\delta U_{m \text{ вых}}$ от амплитуды U_m входного напряжения при заданных значениях частоты f .

3. По полученным графикам зависимостей относительных погрешностей $\delta U_{\text{вых}}$ и $\delta U_{m \text{ вых}}$ от частоты f и амплитуды U_m входного напряжения определяются границы диапазонов частот и амплитуд напряжения, в которых погрешность не превышает заданного допустимого предела.

В соответствии с изложенной методикой авторами проведены экспериментальные исследования разработанного АД, по результатам которых построены приведенные на рис. 4–7 графики зависимостей погрешностей от частоты f и амплитуды U_m в пределах от минус 2 % до +1 %.

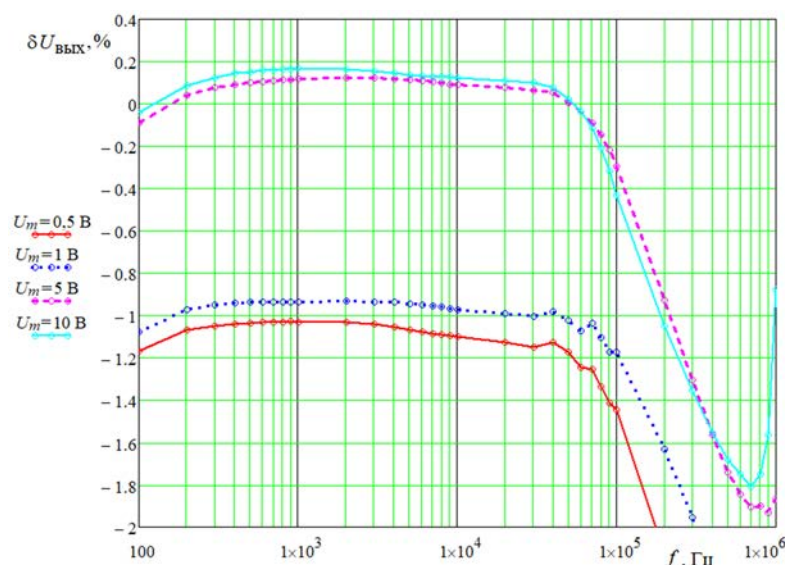


Рис. 4. Графики зависимостей относительной погрешности преобразования среднеквадратичного значения синусоидального напряжения от частоты

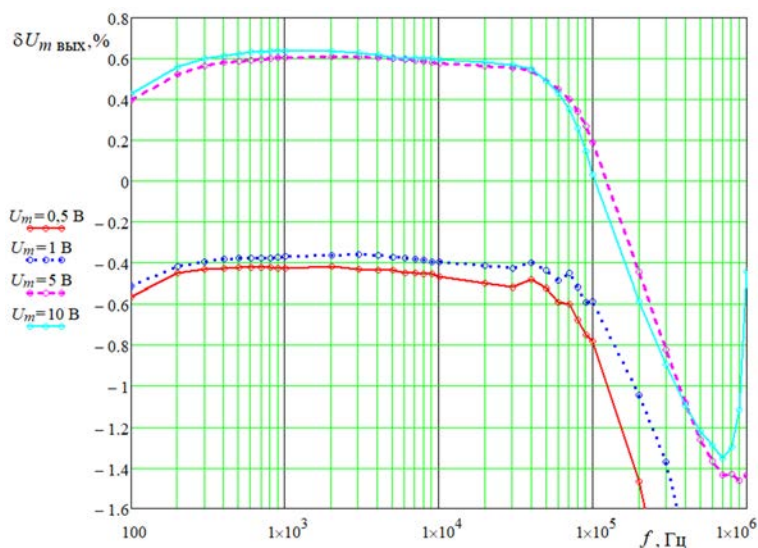


Рис. 5. Графики зависимостей относительной погрешности преобразования амплитуды синусоидального напряжения от частоты

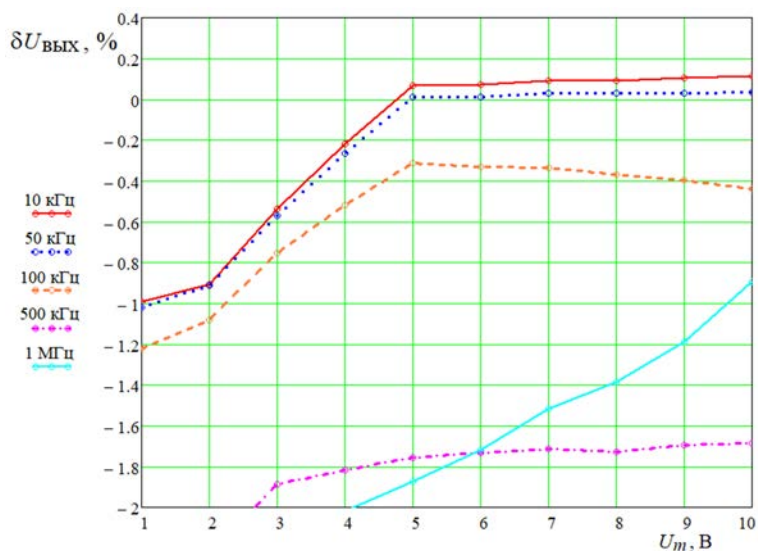


Рис. 6. Графики зависимостей относительной погрешности преобразования среднеквадратичного значения синусоидального напряжения от его амплитуды

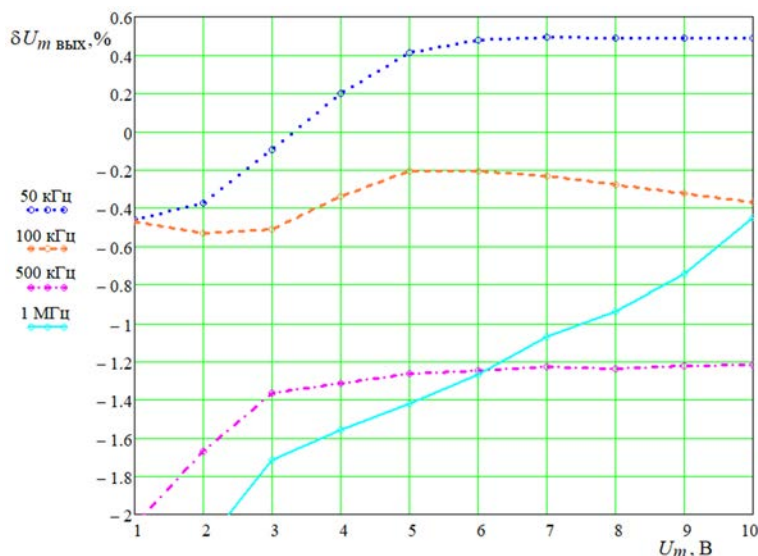


Рис. 7. Графики зависимостей относительной погрешности преобразования амплитуды синусоидального напряжения от его амплитуды

Заключение

Проведенные авторами исследования подтверждают возможность применения амплитудного детектора, реализующего метод неявных вычислений среднеквадратичных значений переменного напряжения, для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей, например, изделий из пьезоматериалов.

Из приведенных результатов экспериментальных исследований амплитудного детектора следует:

- рекомендуемый диапазон амплитуд входного синусоидального напряжения: от 5 до 10 В;
- в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц относительная погрешность преобразования среднеквадратичного значения напряжения не превышает $\pm 2\%$, а относительная погрешность преобразования амплитуды напряжения не превышает $\pm 1,5\%$ (с учетом коррекции аддитивной погрешности в ФНЧ 2).

Список литературы

1. Светлов А. В. Нгуен Н. М. Измерение параметров резонансных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 83–92.
2. Светлов А. В., Нгуен Н. М. Амплитудный детектор для построения средств измерений параметров резонансных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 31–37.
3. Kitckin C., Counts L. RMS to DC conversion application guide. 2nd ed. Analog Devices, 1986.
4. AN-268: RMS-to-DC Converters Ease Measurement Tasks. URL: <https://archive.org/details/AnalogDevices-2370>
5. Дворников О. В. Микроэлектронные преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения. Часть 1. Преобразователи с экспоненциально-логарифмической обратной связью // Компоненты и технологии. 2004. № 9. С. 62–69.
6. Effective Value Detection Module Peak Detection Signal Conditioning Data Acquisition Peak Voltage AD637 Module. DEVMO DQ_Fme10417.
7. Пейтон А. Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М. : Бином, 1994. 352 с.
8. Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех. М. : Додэка-XXI, 2011. 544 с.
9. Filter Design and Analysis. URL: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm>
10. Генератор сигналов UNI-T UTG9002C-II. Технические характеристики. URL: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/
11. YOKOGAWA 7555 Digital Multimeter. URL: <http://www.electro-meters.com/wp-content/uploads/2013/7555.pdf>

References

1. Svetlov A.V. Nguen N.M. Measurement of parameters of resonant electrical circuits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences.* 2021;(3):83–92. (In Russ.)
2. Svetlov A.V., Nguen N.M. An amplitude detector for constructing measuring instruments for resonant electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):31–37. (In Russ.)
3. Kitckin C., Counts L. *RMS to DC conversion application guide. 2nd ed.* Analog Devices, 1986.
4. AN-268: *RMS-to-DC Converters Ease Measurement Tasks.* Available at: <https://archive.org/details/AnalogDevices-2370>
5. Dvornikov O.V. Microelectronic converters of alternating voltage to constant voltage in terms of RMS value. Part 1. Exponential-logarithmic feedback converters. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies.* 2004;(9):62–69. (In Russ.)
6. *Effective Value Detection Module Peak Detection Signal Conditioning Data Acquisition Peak Voltage AD637 Module.* DEVMO DQ_Fme10417.
7. Peyton A.Dzh., Volsh V. *Analogovaya elektronika na operatsionnykh usilutelyakh = Analog electronics on operational amplifiers.* Moscow: Binom, 1994:352. (In Russ.)
8. Karter B., Manchini R. *Operatsionnye usiliteli dlya vseh = Operational amplifiers for everyone.* Moscow: Dodeka-XXI, 2011:544. (In Russ.)
9. *Filter Design and Analysis.* Available at: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm>
10. *Generator signalov UNI-T UTG9002C-II. Tekhnicheskie kharakteristiki = UNI-T UTG9002C-II signal generator. Technical specifications.* (In Russ.). Available at: https://supereyes.ru/catalog/waveform_generator/uni_t_utg9002c_ii/

11. YOKOGAWA 7555 *Digital Multimeter*. Available at: <http://www.electro-meters.com/wp-content/uploads/2013/7555.pdf>

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Вильевич Светлов

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

Anatoliy V. Svetlov

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

Александр Сергеевич Колдов

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

Aleksandr S. Koldov

Engineer of the sub-department of radio
engineering and radio electronic system,
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 20.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.07.2024

Принята к публикации / Accepted 12.08.2024

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОВЕРКЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Б. В. Цыпин¹, С. П. Прокопчук²

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

¹ cypin@yandex.ru, ² sunfil@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является технологическая проверка сложных технических изделий. Предмет исследования – оценка результатов измерений при проведении технологической проверки. Цель работы – представление методов и критериев оценки результатов проверки. *Материалы и методы.* Приведены основные математические соотношения, рекомендации по организации и порядку проведения проверки и для оценки результатов измерений. Теоретический материал проиллюстрирован примером анализа результатов технологической проверки железнодорожной радиостанции. *Результаты.* Материал статьи позволяет объективно оценить качество проверки по критериям стабильности, сходимости и воспроизводимости результатов измерений, смещения результатов и его линейности. *Выводы.* Приведенные материалы позволяют оценить приемлемость измерительного процесса на основе рекомендаций государственных стандартов РФ.

Ключевые слова: измерения, технологическая проверка, измеряемые параметры, анализ измерительного процесса

Для цитирования: Цыпин Б. В., Прокопчук С. П. Оценка результатов измерений при технологической проверке сложных технических объектов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 92–102. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-11

ASSESSMENT OF MEASUREMENT RESULTS DURING TECHNOLOGICAL CHECKING OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

B.V. Tsypin¹, S.P. Prokopchuk²

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

¹ cypin@yandex.ru, ² sunfil@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is technological testing of complex technical products. The subject of the study is the assessment of measurement results during technological testing. The purpose of the work is to present methods and criteria for assessing inspection results. *Materials and methods.* The basic mathematical relationships, recommendations for the organization and procedure of testing and for assessing measurement results are given. The theoretical material is illustrated by an example of analyzing the results of a technological inspection of a railway radio station. *Results.* The material in the article allows us to objectively assess the quality of the test based on the criteria of stability, convergence and reproducibility of measurement results, bias of results and its linearity. *Conclusions.* The presented materials allow us to assess the acceptability of the measurement process based on the recommendations of state standards of the Russian Federation.

Keywords: measurements, technological verification, measured parameters, analysis of the measuring process

For citation: Tsypin B.V., Prokopchuk S.P. Assessment of measurement results during technological checking of complex technical objects. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4): 92–102. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-11

Введение

При технологической проверке технически сложных изделий важно оценить качество проверки по критериям стабильности, сходимости и воспроизводимости результатов измерений, смещения результатов и его линейности. Такая оценка позволяет определить приемлемость измерительного процесса. Процесс оценки качества проверки проиллюстрирован

на примере контроля мощности несущей частоты передатчиков железнодорожных радиостанций РЛСМ-10-30-Д [1, 2].

Исследование измерительного процесса на стабильность

Для исследования стабильности достаточно десяти циклов измерительных экспериментов ($N = 10$), каждый цикл включает три измерения ($Q = 3$). Измерения должны проводиться одним оператором через равные интервалы времени. Результаты заносятся в «Контрольную карту средних и размахов»¹. Пример такой карты приведен на рис. 1 [1].

Контрольная карта средних и размахов

Радиостанция	РЛСМ-10-30		
Измеряемый параметр:	Мощность несущей частоты передатчиков		
Единицы измерения:	Вт		
Норма для радиостанции:	10,0	Верхняя граница допуска, USL :	11,0
Нижняя граница допуска, LSL :	9,0		
Средство измерения:	Анализатор системы связи R8000B		
Номер СИ	800LQW0012		
Количество циклов, N :	10		
Количество измерений в цикле, Q :	3		
Количество операторов, M :	1		

№ цикла	№ измерения в цикле			Расчетные значения							
	1	2	3	$X_{ср.i}$	$X_{ср.ср.}$	UCL_x	LCL_x	R_i	$R_{ср.}$	UCL_R	LCL_R
1	9,60	9,60	9,70	9,633	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
2	9,70	9,70	9,70	9,700	9,647	9,708	9,585	0,000	0,060	0,154	0,000
3	9,60	9,60	9,70	9,633	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
4	9,60	9,60	9,60	9,600	9,647	9,708	9,585	0,000	0,060	0,154	0,000
5	9,60	9,70	9,60	9,633	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
6	9,70	9,70	9,70	9,700	9,647	9,708	9,585	0,000	0,060	0,154	0,000
7	9,70	9,70	9,60	9,667	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
8	9,60	9,60	9,60	9,600	9,647	9,708	9,585	0,000	0,060	0,154	0,000
9	9,60	9,70	9,60	9,633	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
10	9,60	9,70	9,70	9,667	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000

Рис. 1. Контрольная карта средних и размахов

Таким образом, массив данных результатов экспериментов содержит N циклов повторных измерений образца по Q измерений. Каждое значение массива X_{ik} – результат k -го измерения образца в i -м цикле, т.е. индекс i – номер цикла измерений от 1 до N ; k – номер измерения образца в цикле от 1 до Q ².

Для каждого i -го цикла измерений рассчитывается среднее значение результатов измерений $X_{ср.i}$, среднее значение результатов всех измерений $X_{ср.ср.}$, контрольные границы для средних UCL_x и LCL_x , размах результатов измерений R_i , средний размах $R_{ср.}$, а также контрольные границы для размахов UCL_R и LCL_R [1] по следующим формулам:

$$X_{ср.i} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_{ik}; \quad (1)$$

$$R_i = \max_{k=1, Q} (X_{ik}) - \min_{k=1, Q} (X_{ik});$$

$$X_{ср.ср.} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ср.i};$$

¹ ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039941>

² Там же.

$$R_{cp.} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i;$$

$$UCL_X = X_{cp.cp.} + A_2 R_{cp.};$$

$$LCL_X = X_{cp.cp.} - A_2 R_{cp.};$$

$$UCL_R = D_4 R_{cp.};$$

$$LCL_R = D_3 R_{cp.},$$

где UCL_X , LCL_X – верхняя и нижняя границы контрольной карты средних соответственно; UCL_R , LCL_R – верхняя и нижняя границы контрольной карты размахов соответственно; A_2, D_4, D_3 – константы для построения контрольных границ для средних и размахов, зависящие от количества измерений в одном цикле измерений.

Полученные результаты заносятся в «Контрольную карту средних и размахов» (рис. 1), а линии среднего значения измеряемого параметра, среднего размаха, контрольных границ наносятся на «График средних и размахов» (рис. 2).

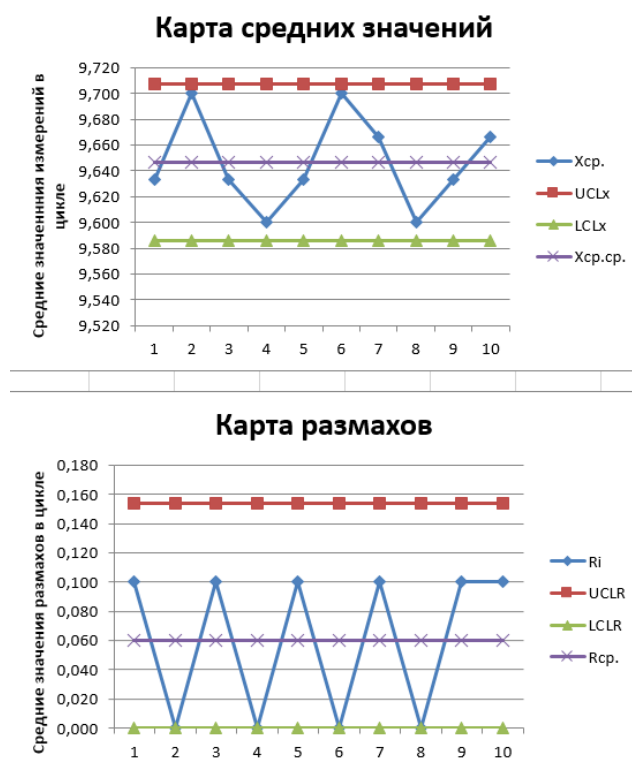


Рис. 2. График средних и размахов

Для оценки стабильности сначала проводится анализ карты размахов. В приведенном примере процесс считается стабильным, так как все нанесенные точки находятся в пределах контрольных границ, отсутствуют серии точек по одну сторону от среднего значения, наличие тренда не наблюдается, отсутствуют группы точек около линии средних и около контрольных границ¹.

По тем же параметрам, применяемым для оценивания стабильности карты размахов, проводится оценка карты средних значений.

Если анализ «Контрольной карты средних и размахов» показывает, что измерительный процесс стабилен и находится в управляемом состоянии, проводятся дальнейшие исследования

¹ ГОСТ Р 51814.3–2001. Системы качества в автомобилестроении. Методы статистического управления процессами. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026563>

измерительного процесса. В рассмотренном случае измерительный процесс стабилен и находится в управляемом состоянии, поэтому можно проводить дальнейшие исследования измерительного процесса.

В случае нестабильности измерительного процесса специалистом проводятся дополнительные исследования причин изменчивости процесса в соответствии с рекомендациями раздела 11 ГОСТ Р 51814.5–2005¹.

После устранения особых причин изменчивости и снижения влияния обычных причин изменчивости проводят повторные исследования стабильности измерительного процесса.

Оценка смещения и линейности смещения измерительного процесса

Смещение измерительного процесса оценивается как разность между средним значением результатов многократных измерений и предполагаемым истинным значением измеряемого параметра [1]. Проводят по 10 измерений, результаты которых заносятся в «Контрольный лист данных для расчета смещения измерительного процесса».

За предполагаемое истинное значение $X_{ист.}$ берется среднее значение измерений. Далее рассчитываются среднее значение результатов измерений, абсолютное значение смещения измерительного процесса и относительное значение смещения измерительного процесса. Полученный результат считается приемлемым, если смещение составляет менее 10 %.

Для оценки линейности смещения измерительного процесса берется пять образцов проверяемых изделий, по каждому из которых проводится по 10 измерений. Далее рассчитываются для каждого образца показатели, которые находили при оценке смещения измерительного процесса. Кроме этого, вычисляются коэффициент корреляции, коэффициенты уравнения линии регрессии, абсолютное и относительное значения линейности измерительного процесса. Все измерения и расчеты заносятся в «Контрольный лист данных для расчета линейности смещения измерительного процесса» (рис. 3), а линию регрессии наносят на «График линейности смещения измерительного процесса» (рис. 4).

Контрольный лист для расчета смещения измерительного процесса

Радиостанция

Р.ЛСМ-10-30

Измеряемый параметр: Мощность несущей частоты передатчиков Единицы измерения: Вт

Истинное значение: 9,66 Верхняя граница допуска, USL: 11,0 Нижняя граница допуска, LSL: 9,0

Средство измерения: Анализатор системы связи R8000B Номер СИ: 800LQW0012

№ образца 1

Количество измерений в цикле, Q: 10

Количество операторов, M: 1

Результаты измерений образца специалистом:

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значения, X	9,700	9,700	9,600	9,600	9,700	9,700	9,600	9,600	9,700	9,700
$X_{ист.} =$	9,660									

Результаты измерений образца оператором:

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значения, X	9,600	9,700	9,600	9,600	9,600	9,700	9,700	9,600	9,600	9,600
$X_{ф.}$	9,630	среднее результатов измерения								
B	-0,030	абсолютное смещения измерительного процесса								
%B	1,500	относительное смещения измерительного процесса								

Рис. 3. Контрольный лист для расчета смещения измерительного процесса

¹ ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039941>

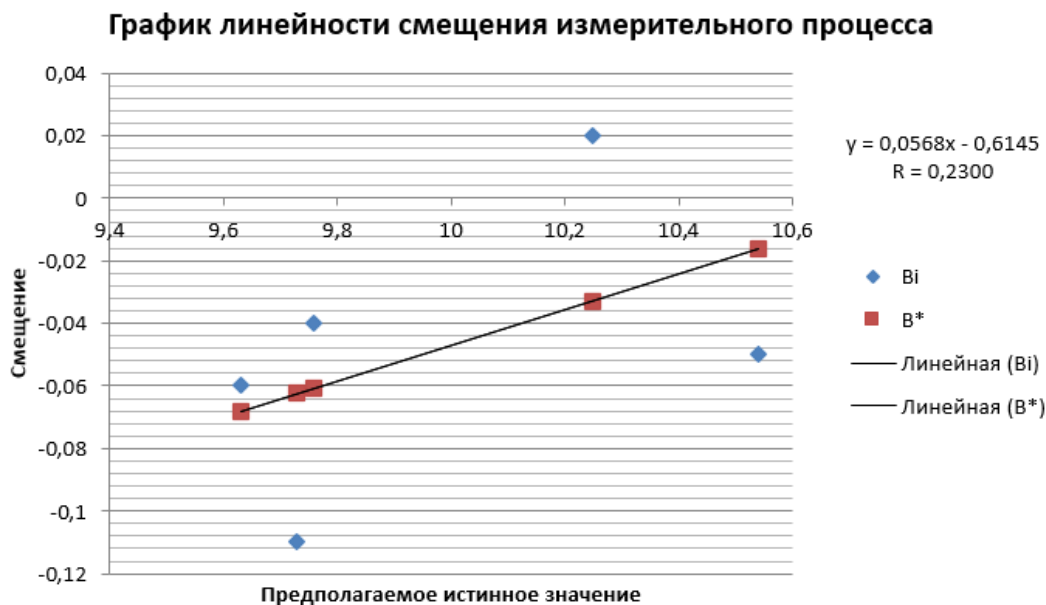


Рис. 4. График линейности смещения измерительного процесса

За предполагаемое истинное значение $X_{\text{ист.}}$ берется среднее значение измерений, полученных специалистом:

$$X_{\text{ист.}} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_k.$$

Далее рассчитываются следующие показатели: среднее значение результатов измерений, выполненных оператором $X_{\text{ср.}}$, абсолютное значение смещения измерительного процесса B , относительное значение смещения измерительного процесса $\%B$.

Для этого применяются следующие формулы:

$$X_{\text{ср.}} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_k;$$

$$B = X_{\text{ср.}} - X_{\text{ист.}};$$

$$\%B = \frac{|B|}{USL - LSL} 100,$$

где USL , LSL – верхняя и нижняя границы допуска на измеряемый параметр.

По окончании измерений массив данных должен содержать ровно Q повторных измерений образца, в котором каждое значение X_k – результат k -го измерения образца (индекс k – номер измерения образца от 1 до Q). Полученный результат $\%B$ считается приемлемым, если составляет менее 10 %, в приведенном примере $\%B = 1,50 \%$ ¹.

В качестве характеристики линейности смещения процесса измерения рассматривают величину наклона прямой, которая наилучшим образом аппроксимирует зависимость средних значений смещения для различных образцов от их предполагаемых истинных значений, при этом предполагаемые истинные значения испытываемых образцов должны представлять все возможные значения измеряемого параметра для данного измерительного процесса, а также быть равномерно распределены по всему рабочему диапазону.

Для оценки линейности смещения измерительного процесса берется пять изделий ($N = 5$), по каждому из которых проводится по 10 измерений ($Q = 10$), при этом образцы выбираются в случайном порядке. Массив данных содержит Q повторных измерений каждого из N образцов,

¹ ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039941>

в котором каждое значение X_{ik} – результат k -го измерения i -го изделия (i – его номер от 1 до N , k – номер каждого измерения от 1 до Q).

Далее для каждого образца рассчитываются предполагаемые истинные значения $X_{ист.i}$ измеряемых параметров по формуле (1), а также среднее значение для каждого образца:

$$X_{cp.i} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_{ik},$$

где X_{ik} – результат k -го измерения параметра i -го образца изделия.

Затем вычисляется абсолютное значение смещения измерительного процесса для каждого из образцов по формуле

$$B_i = X_{cp.i} - X_{ист.i},$$

где $X_{ист.i}$ – предполагаемое истинное значение измеряемого параметра i -го образца; B_i – смещение при измерении параметра i -го образца.

Кроме этого, вычисляется коэффициент корреляции R , коэффициенты уравнения линии регрессии B^* , абсолютное L и относительное $\%L$ значения линейности измерительного процесса:

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^N (X_{ист.i} B_i) - \sum_{i=1}^N X_{ист.i} \sum_{i=1}^N B_i}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N (X_{ист.i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N X_{ист.i} \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N B_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N B_i \right)^2 \right]}};$$

$$B^* = aX_{ист.} + b,$$

где B^* – значение смещения, полученное с помощью уравнения регрессии; a , b – коэффициенты уравнения линии регрессии, получаемые по формулам

$$a = \frac{N \sum_{i=1}^N (X_{ист.i} B_i) - \sum_{i=1}^N X_{ист.i} \sum_{i=1}^N B_i}{N \sum_{i=1}^N (X_{ист.i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N X_{ист.i} \right)^2};$$

$$b = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N B_i - a \sum_{i=1}^N X_{ист.i} \right);$$

$$L = a(UL - LL);$$

$$\%L = \frac{|L|}{UL - LL} 100 ,$$

где UL , LL – верхняя и нижняя границы рабочего диапазона измерительного процесса соответственно.

Все измерения и расчеты заносятся в «Контрольный лист данных для расчета линейности смещения измерительного процесса» (рис. 5).

Считается, что при значениях коэффициента корреляции в диапазоне $0 \div 0,5$ линейная связь между величинами практически отсутствует (изменение смещения в пределах рабочего диапазона нелинейно); в пределах $0,5 \div 0,75$ линейная связь между величинами слабая (изменение смещения в пределах рабочего диапазона нельзя считать линейным); в диапазоне $0,75 \div 0,90$ линейная связь между величинами средняя (изменение смещения в пределах рабочего диапазона можно считать линейным); в пределах $0,90 \div 1$ линейная связь между величинами сильная (изменение смещения в пределах рабочего диапазона линейно) [3].

В примере линейная связь между предполагаемым истинным значением измеряемого параметра и соответствующими смещениями измерительного процесса практически отсутствует (коэффициент корреляции $R^2 < 0,5$) [1], т.е. изменение смещения в пределах рабочего диапазона нелинейно. Относительное значение линейности смещения измерительного процесса $\%L$ считается приемлемым, поскольку не превышает 10 % [1].

Контрольный лист для расчета линейности смещения измерительного процесса

Радиостанция	РЛСМ-10-30			Единицы измерения:	ВТ
Измеряемый параметр:	Мощность несущей частоты передатчиков			Верхняя граница допуска, USL :	11,0
Норма для радиостанции:	10,0			Нижняя граница допуска, LSL :	9,0
Средство измерения:	Анализатор системы связи R8000B			Номер СИ	800LQW0012
Количество образцов, N :	5				
Количество попыток, Q :	10				
Количество операторов, M :	1				

Результаты измерений образцов специалистом:

Попытка	№ Образца				
	1	2	3	4	5
1	9,8	9,8	10,5	9,6	10,2
2	9,8	9,7	10,5	9,6	10,2
3	9,8	9,7	10,5	9,6	10,3
4	9,6	9,7	10,5	9,7	10,3
5	9,7	9,8	10,6	9,7	10,2
6	9,7	9,8	10,6	9,6	10,3
7	9,7	9,8	10,5	9,6	10,2
8	9,8	9,8	10,5	9,6	10,2
9	9,7	9,8	10,6	9,7	10,3
10	9,7	9,7	10,6	9,6	10,3
$X_{ист.}$	9,73	9,76	10,54	9,63	10,25
	Сумма				49,91

Результаты измерений образцов оператором и расчеты:

Попытка	№ Образца				
	1	2	3	4	5
1	9,6	9,8	10,5	9,5	10,2
2	9,6	9,7	10,4	9,6	10,2
3	9,6	9,7	10,5	9,6	10,3
4	9,6	9,8	10,5	9,7	10,2
5	9,6	9,8	10,4	9,6	10,2
6	9,7	9,8	10,5	9,6	10,3
7	9,7	9,7	10,5	9,5	10,3
8	9,6	9,7	10,5	9,5	10,3
9	9,6	9,6	10,6	9,5	10,3
10	9,6	9,6	10,5	9,6	10,4
$X_{ср}$	9,62	9,72	10,49	9,57	10,27
	Сумма				

Рис. 5. Контрольный лист для расчета линейности смещения измерительного процесса

Оценка сходимости и воспроизводимости результатов измерений

Сходимость результатов измерений отражает степень близости результатов последовательных измерений одного и того же измеряемого параметра, выполненных повторно одними и теми же средствами измерительной техники, одним и тем же методом и одним и тем же оператором. Воспроизводимость результатов измерений показывает близость результатов измерений одного и того же измеряемого параметра, выполненных при измененных условиях измерений.

Для оценивания сходимости и воспроизводимости используется метод средних и размахов. Для эксперимента отбирается 10 изделий ($N = 10$). Три оператора ($M = 3$) поочередно выполняют измерения всех образцов. Измерение одного образца каждым оператором повторяется 3 раза ($Q = 3$).

По окончании эксперимента массив данных содержит ровно Q повторных измерений каждого из N образцов каждым из M операторов, в котором каждое значение X_{ijk} – результат k -го измерения i -го образца j -м оператором, где i – номер образца от 1 до N , j – номер оператора от 1 до M , k – номер измерения каждого образца каждым оператором от 1 до Q .

Полученные данные и предварительные расчеты заносятся в табл. 1 «Контрольный лист данных для расчета сходимости и воспроизводимости измерительного процесса».

Таблица 1

Контрольный лист данных для расчета сходимости
и воспроизводимости измерительного процесса

Операторы и попытки		Порядковые номера										Средние и размахи
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Оператор 1:	1											
	2											
	3											
Среднее		(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(4)
Размах		(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(5)
Оператор 2:	1											
	2											
	3											
Среднее		(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(4)
Размах		(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(5)
Оператор 3:	1											
	2											
	3											
Среднее		(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(4)
Размах		(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(5)
Среднее		(6)	(6)	(6)	(6)	(6)	(6)	(3)	(6)	(6)	(6)	(7)
R_p		(8)										
$R_{cp.}$		(9)										
R_o		(10)										

Проводятся следующие предварительные расчеты [1]:

1) для каждого образца высчитывается среднее значение $X_{cp.ij*}$ и размах результатов R_{ij} его измерений каждым из операторов:

$$X_{cp.ij*} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_{ikj}; \quad (2)$$

$$R_{ij} = \max_{k=1, Q} (X_{ikj}) - \min_{k=1, Q} (X_{ikj}). \quad (3)$$

Результаты измерений и расчетов вносятся в соответствующие ячейки (2) и (3) табл. 1, обозначенные по номерам формул;

2) для каждого оператора рассчитывается среднее значение $X_{cp.*j*}$ и средний размах $R_{cp.*j}$ результатов его измерений:

$$X_{cp.*j*} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{cp.ij*}; \quad (4)$$

$$R_{cp.*j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ij}. \quad (5)$$

Результаты вносятся в соответствующие ячейки (4) и (5) табл. 1;

3) для каждого образца вычисляется среднее значение результатов его измерений всеми операторами $X_{cp.i**}$:

$$X_{cp.i**} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M X_{cp.ij*}. \quad (6)$$

Расчеты средних заносят в соответствующие ячейки (6) табл. 1;

4) находится среднее значение всех результатов измерений образцов $X_{cp.***}$:

$$X_{\text{ср.***}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{ср.i***}} \quad (7)$$

Результаты расчетов вносятся в соответствующие ячейки (7) табл. 1;

5) определяется размах значений параметра образцов R_p , средний размах всех измерений $R_{\text{ср.}}$, размах между измерениями операторов R_o :

$$R_p = \max_{i=1, N} (X_{\text{ср.i**}}) - \min_{i=1, N} (X_{\text{ср.i**}}); \quad (8)$$

$$R_{\text{ср.}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M R_{\text{ср.*j}}; \quad (9)$$

$$R_o = \max_{j=1, M} (X_{\text{ср.*j*}}) - \min_{j=1, M} (X_{\text{ср.*j*}}). \quad (10)$$

Результаты вносятся в соответствующие ячейки табл. 1.

Полученные результаты применяются для последующих расчетов среднеквадратических отклонений (СКО) и составляющих изменчивости измерительного процесса. Рассчитываются:

1) оценка СКО сходимости (повторяемости) измерительного процесса S_e :

$$S_e = \frac{R_{\text{ср.}}}{D_2},$$

где D_2 – константа для вычисления СКО с помощью размаха¹.

При выборе константы D_2 для расчета сходимости принимают $H = Q$ и $G = M * N$;

2) оценка СКО воспроизводимости (изменчивости от оператора) измерительного процесса S_o :

$$S_o = \sqrt{\left[\frac{R_o}{D_2} \right]^2 - \left[\frac{S_e^2}{NQ} \right]},$$

где D_2 – константа для вычисления СКО с помощью размаха.

При выборе константы D_2 для расчета воспроизводимости принимают $H = M$ и $G = 1$.

Если под радикалом окажется отрицательное число, $S_o = 0$;

3) оценка СКО изменчивости образца измерительного процесса S_p :

$$S_p = \frac{R_p}{D_2},$$

где D_2 – константа для вычисления СКО с помощью размаха.

При выборе константы D_2 для расчета воспроизводимости принимают $H = N$ и $G = 1$;

4) составляющие изменчивости:

– сходимость EV результатов измерений (повторяемость):

$$EV = K_\alpha S_e;$$

– воспроизводимость AV результатов измерений (изменчивость от операторов):

$$AV = K_\alpha S_o;$$

– сходимость и воспроизводимость $R \& R$ результатов измерений:

$$R \& R = \sqrt{EV^2 + AV^2};$$

¹ ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039941>

- изменчивость PV образцов:

$$PV = K_{\alpha} S_p ;$$

- полная изменчивость TV измерительного процесса:

$$TV = \sqrt{R \& R^2 + PV^2} ,$$

где K_{α} – определяют исходя из уровня значимости и таблицы значений функции Лапласа. Для рекомендуемого уровня значимости $\alpha = 0,99$ значение $K_{\alpha} = 5,15$; S_o – СКО анализируемой составляющей изменчивости.

5) относительные значения составляющих изменчивости (сходимость, воспроизводимость, изменчивость образца, взаимодействие оператора и образца) по формулам:

$$\%EV_{TV} = \frac{EV}{TV} 100 ,$$

$$\%AV_{TV} = \frac{AV}{TV} 100 ,$$

$$\%PV_{TV} = \frac{PV}{TV} 100 .$$

При подстановке в приведенные формулы вместо полной изменчивости TV измерительного процесса величины допуска $USL - LSL$ получают относительную изменчивость составляющих процесса относительно допуска.

Оценка приемлемости измерительного процесса

Анализ приемлемости измерительного процесса состоит в сравнении сходимости и воспроизводимости с допуском на измеряемый параметр $\%R\&R_{SL}$ или полной изменчивостью измеряемого параметра образца $\%R\&R_{TV}$. В приведенном примере измерительный процесс считается приемлемым, поскольку эти значения не превышают 10 % (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчетов для рассмотренного примера

Характеристика	Значение характеристики	Допускаемый предел характеристики	Вывод о приемлемости
1. Стабильность	–	–	Приемлемо
2. Смещение, $\%B$	1,5 %	≤ 10 %	Приемлемо
3. Линейность, $\%L$	5,7 %	≤ 10 %	Приемлемо
4. Сходимость и воспроизводимость:			
– $\%R\&R_{SL}$;	8,7 %	≤ 10 %	Приемлемо
– $\%R\&R_{TV}$	8,3 %	≤ 10 %	Приемлемо

В табл. 2 отображены результаты расчетов всех характеристик анализируемого измерительного процесса с оценкой его приемлемости.

Заключение

По результатам анализа для приведенного примера проверки железнодорожных радиостанций все характеристики измерительного процесса были признаны приемлемыми.

На измерительный процесс оказывает влияние очень много факторов: образцы измерений, индивидуальные особенности операторов, средства измерений, методы измерений, окружающая среда [3]. Анализ измерительного процесса помогает выявить взаимосвязи между этими факторами [1].

Список литературы

1. Прокопчук С. П., Цыпин Б. В. Анализ измерительного процесса при технологической проверке железнодорожных радиостанций // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 423–426.
2. ООО КБ «ПУЛЬСАР-ТЕЛЕКОМ». URL: <https://www.pulsar-telecom.ru/catalog>
3. Рихтер Е. В. Анализ измерительных систем // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 2, № 12. С. 199–201. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izmeritelnyh-sistem>

References

1. Prokopchuk S.P., Tsy-pin B.V. Analysis of the measuring process during technological verification of the same forest-road radio stations. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:423–426. (In Russ.)
2. ООО КБ «PUL"SAR-TELEKOM» = KB LLC "PULSAR-TELECOM". (In Russ.). Available at: <https://www.pulsar-telecom.ru/catalog>
3. Rikhter E.V. Analysis of measuring systems. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики = Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2016;2(12):199–201. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izmeritelnyh-sistem>

Информация об авторах / Information about the authors**Борис Вульфович Цыпин**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsy-pin@yandex.ru

Boris V. Tsy-pin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of space-rocket
and aviation instrument making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлана Павловна Прокопчук

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

Svetlana P. Prokopchuk

Master degree 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 11.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 05.08.2024

Принята к публикации / Accepted 02.09.2024

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОМБИНИРОВАНИЯ НЕРАВНОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ СПУТНИКОВ

С. В. Логунов¹, Е. В. Благодыренко², И. С. Герасименко³, Н. А. Куприянов⁴

^{1, 2, 3} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков

имени Героя Советского Союза А. К. Серова, Краснодар-5, Россия

¹ skobarik83@rambler.ru, ² blagodyrenroev@mail.ru, ³ iger60@mail.ru, ⁴ sektor-ussr@rambler.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Задача недопущения орбитальных инцидентов требует обеспечения контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит многоспутниковых космических систем с высокоточным определением текущих навигационных параметров каждого наблюдаемого спутника как с учетом движения объектов по круговым орбитам, так и маневрирующих с включенными ионными двигателями. Используемые для наблюдения спутников разнотипные средства (оптические и радиолокационные) обладают взаимодополняющими характеристиками, обобщение которых позволило бы проводить всесуточные всепогодные измерения текущих навигационных параметров маневрирующих спутников и вести их каталог с точностями, соответствующими разбросу по координатам в пределах десятков сантиметров. При обобщении результатов существенно неравноточных измерений возникает противоречие между методами формирования опорной орбиты спутника, полученной по результатам измерений радиолокационными средствами, и необходимым условием попадания опорной орбиты в область разброса оценок текущих навигационных параметров при проведении сеанса измерений оптическими средствами для их совместной обработки. *Материалы и методы.* Для решения данной задачи авторы предлагают комбинирование и комплексирование неравноточных измерений, которые, в свою очередь, требуют определить пороговые значения погрешностей измерений. Выбор пороговых значений погрешностей измерений связан с самим понятием существенно неравноточных измерений текущих навигационных параметров. Показано, что порог, при котором происходит переход от комбинирования к комплексированию неравноточных измерений, будет определяться соотношением величин среднеквадратического отклонения различных средств измерений. Учтено, что размер доверительного интервала в точке скачкообразного изменения доверительного интервала оцениваемых текущих навигационных параметров спутника со стороны участка прогноза определяется величинами среднеквадратического отклонения прогноза, а размер доверительного интервала со стороны участка измерений определяется инструментальной погрешностью оптического средства. Это позволило рассматривать область инструментальной погрешности оптического средства по каждому измерению как новую границу доверительного интервала случайной величины, имеющей распределение с параметрами, соответствующими окончанию участка прогноза. Затем, используя известные положения теории вероятностей, были определены пороговые значения погрешностей. *Результаты.* Установлена зависимость между пороговой величиной доверительной вероятности и соответствующим значением гарантийного коэффициента. Получены значения векторов пороговых значений погрешностей для оценок текущих навигационных параметров спутников, которые формируются при переходе с одного участка измерений или прогноза на другой при известных векторах оценок погрешностей текущих навигационных параметров. Это позволяет рассчитывать значения векторов пороговых значений погрешностей для оценок текущих навигационных параметров спутников, в том числе маневрирующих, на любой момент времени. *Выводы.* Реализация предложенного подхода позволит обеспечить выполнение требований по недопущению орбитальных инцидентов в космосе по точности и оперативности за счет комбинирования информации о космической обстановке от разнотипных измерительных средств. Установлено, что существует предел по достоверности для соотношения погрешностей величин при их совместной обработке, выше которого результат комплексирования становится гарантированно недостоверным. В статье величина данного предела определена для случая нормального распределения.

Ключевые слова: искусственный спутник Земли, объект космического мусора, наземная оптическая система, квантово-оптическая система, радиолокационная станция дальнего обнаружения

Благодарности: авторский коллектив благодарит доктора технических наук, профессора, начальника комплексного отдела, заместителя генерального конструктора АО «РТИ» Тимошенко Александра Васильевича за значимые замечания и важнейшие советы при проведении исследований и обсуждении их результатов.

Для цитирования: Логунов С. В., Благодыренко Е. В., Герасименко И. С., Куприянов Н. А. Определение пороговых значений погрешностей для применения метода комбинирования неравноточных измерений параметров движения маневрирующих спутников // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 103–115. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-12

DETERMINATION THRESHOLD ERRORS FOR THE APPLICATION OF THE METHOD OF COMBINING NON-PRECISION MOTION PARAMETERS MEASUREMENTS MANEUVERING SATELLITES

S.V. Logunov¹, E.V. Blagodyrenko², I.S. Gerasimenko³, N.A. Kupriyanov⁴

^{1,2,3} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

⁴ Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov, Krasnodar-5, Russia

¹ skobarik83@rambler.ru, ² blagodyrenroev@mail.ru, ³ iger60@mail.ru, ⁴ sektor-ussr@rambler.ru

Abstract. *Background.* The task of preventing orbital incidents requires monitoring the occupancy of the working and intermediate orbits of multi-satellite space systems with high-precision determination of the current navigation parameters of each observed satellite, both taking into account the movement of objects in circular orbits and maneuvering with ion engines turned on. The various types of means used for satellite observation (optical and radar) have complementary characteristics, the generalization of which would allow for daily all-weather measurements of the current navigation parameters of maneuvering satellites and to maintain their catalog with accuracy corresponding to the coordinate spread within tens of centimeters. When summarizing the results of significantly uneven measurements, a contradiction arises between the methods of forming the satellite reference orbit obtained from radar measurements and the necessary condition for the reference orbit to fall into the range of estimates of current navigation parameters during a measurement session with optical means for their joint processing. *Materials and methods.* To solve this problem, the authors propose the combination and integration of non-precision measurements, which, in turn, requires determining the threshold values of measurement errors. The choice of measurement error thresholds is related to the very concept of significantly uneven measurements of current navigation parameters. It is shown that the threshold at which the transition from combination to integration of non-precision measurements takes place will be determined by the ratio of the values of the COE of various measuring instruments. It is taken into account that the size of the confidence interval at the point of abrupt change in the confidence interval of the estimated current navigation parameters of the satellite from the forecast area is determined by the values of the forecast time interval, and the size of the confidence interval from the measurement area is determined by the instrumental error of the optical means. This made it possible to consider the area of instrumental error of the optical means for each measurement as a new boundary of the confidence interval of a random variable having a distribution with parameters corresponding to the end of the forecast section. Then, using the known provisions of probability theory, the error thresholds were determined. *Results.* The dependence between the threshold value of the confidence probability and the corresponding value of the guarantee coefficient has been established. The values of the error threshold vectors for estimates of the current navigation parameters of satellites are obtained, which are formed during the transition from one measurement site or forecast to another with known error estimation vectors of the current navigation parameters. This makes it possible to calculate the values of the error threshold vectors for estimating the current navigation parameters of satellites, including maneuvering ones, at any given time. *Conclusions.* The implementation of the proposed approach will ensure compliance with the requirements for preventing orbital incidents in space in terms of accuracy and efficiency by combining information about the space situation from different types of measuring instruments. It is established that there is a confidence limit for the ratio of errors of quantities during their joint processing, above which the result of aggregation becomes guaranteed unreliable. In the article, the value of this limit is determined for the case of a normal distribution.

Keywords: artificial earth satellite, space debris object, ground-based optical system, quantum optical system, long-range detection radar

Acknowledgements: the team of authors thanks Alexander Timoshenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Complex Department, Deputy General Designer of JSC RTI, for significant comments and important advice when conducting research and discussing their results.

For citation: Logunov S.V., Blagodyrenko E.V., Gerasimenko I.S., Kupriyanov N.A. Determination threshold errors for the application of the method of combining non-precision motion parameters measurements maneuvering satellites. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):103–115. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-12

Введение

Влияние атмосферы и гравитационного поля Земли обеспечивает гарантированное «очищение» космоса от объектов космического мусора (ОКМ) с высотами орбит менее 1 000 км в течение времени от 3 месяцев до 30 лет в зависимости от высоты их орбиты, что необходимо учитывать при создании многоспутниковых космических систем (КС) [1, 2]. Например, в настоящее время группировка искусственных спутников Земли (ИСЗ) «Старлинк», запущенных с мая 2019 г., насчитывает более 2 000 шт., из которых многие к концу 2023 г. были сведены с орбиты или превратились в ОКМ [3]. При этом количество вышедших из строя ИСЗ, которые не удалось свести с орбиты, составляет порядка 25 % [4]. Всего группировка ИСЗ «Старлинк» будет насчитывать порядка 4 400 функционирующих спутников (а в перспективе – порядка 12 000 шт.), что существенно увеличит количество ИСЗ и ОКМ на рабочих орбитах и орбитах выведения уже в ближайшие годы (рис. 1).

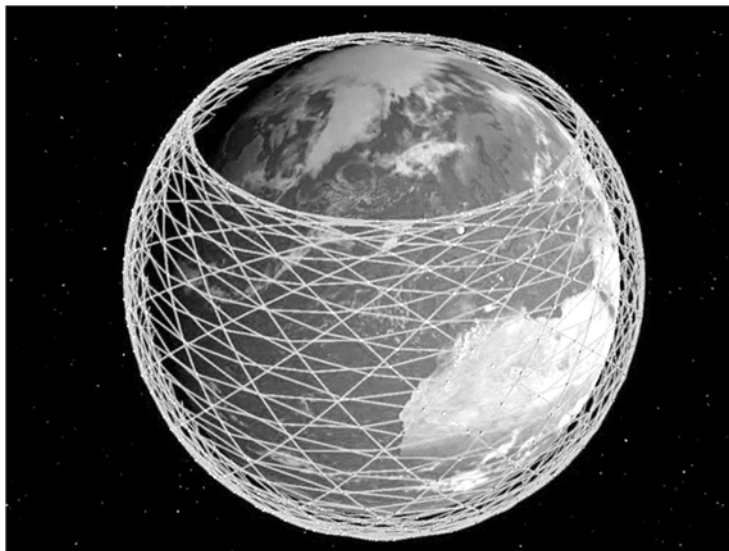


Рис. 1. Расположение плоскостей орбит группировки ИСЗ «Старлинк»

Группировку ИСЗ «Старлинк» изначально планировалось развертывать на орбитах с высотами 1 100...1 325 км, но впоследствии был выбран диапазон высот орбит 550...560 км с запланированным сходом с орбиты в течение 5 лет в случае выхода спутника из строя [5]. При этом развертывание группировки ИСЗ на рабочих орбитах осуществляется с использованием промежуточных орбит с высотами 280...290 км, время баллистического существования которых составляет порядка 100 суток [6]. В дальнейшем повышение орбиты до рабочей обеспечивается ионными двигателями самих ИСЗ. Это потенциально уменьшает засоренность рабочего «слоя» с высокой заселенностью.

Координатная и некоординатная информация о многоспутниковых КС так же, как и обо всех космических объектах в целом, поступает от множества разнотипных средств наблюдения, рассмотренных ниже.

Источники информации об обстановке в околоземном космическом пространстве

Задача недопущения орбитальных инцидентов требует обеспечения контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит многоспутниковых КС с высокоточным определением текущих навигационных параметров (ТНП) каждого наблюдаемого спутника как с учетом движения ИСЗ и ОКМ по круговым орбитам, так и более сложных, с точки зрения наблюдения спутников, движущихся с включенными ионными двигателями [7]. Эта задача должна решаться специально предназначенными для этого системами, например, существующими NASA и NORAD, Европейского космического агентства, а также средствами российской системы контроля космического пространства и создаваемой государственной корпорацией «Роскосмос» автоматизированной системой предупреждения об опасных ситуациях (АСПОС) в ОКП [8, 9]. Перечисленные системы функционируют длительное время, однако создание многоспутниковых КС ужесточает требования к качеству их работы, информационным возможностям,

точности и достоверности циркулирующей в них информации, что предопределяет необходимость совершенствования способов получения и обработки информации о наблюдаемых объектах [10, 11]. Обобщение полученных данных осуществляется их сведением в каталоги ИСЗ, функционирующих как автоматизированные системы управления базами данных, работающих в режиме прогноза с его уточнением по результатам измерений параметров движения ИСЗ и ОКМ.

Такое взаимодействие налажено между ведущими странами в рамках контроля стратегических вооружений и пилотируемой космической деятельности, однако развертывание группировки ИСЗ «Старлинк» с остальными космическими державами в полной мере согласовано не было, несмотря на появление очевидной новой угрозы безопасности космической деятельности на орбитах с высотами от 500 км и более [3].

В нашей стране источниками информации об обстановке в ОКП выступают организации, осуществляющие космическую деятельность, а также подразделения Российской академии наук и Министерства обороны России, имеющие необходимые информационные средства наблюдения за ИСЗ. Эти разнотипные средства территориально расположены как на территории России, так и за ее пределами.

Парирование угроз и опасных ситуаций в космосе должно осуществляться специализированной системой, например, системой оперативного реагирования на угрозы в космосе (СОРУК). В качестве прототипа возможной основы создания и развития СОРУК в России может выступать российская АСПОС ОКП, получающая информацию от разнотипных средств наблюдения. Так, основным достоинством наземных оптических средств (НОС) и квантово-оптических средств (КОС) является прецизионная точность измерений ТНП ИСЗ по сравнению с радиолокационными станциями дальнего обнаружения (РЛС ДО) [12, 13]. Недостатками НОС и КОС являются [14]:

- метеозависимость и ограничение благоприятным для наблюдений временем суток, что существенно ограничивает их возможности по контролю заданных ИСЗ и потоку измерений;
- узкопольность оптических систем, что делает для них основным режим работы по целеуказанию.

Очевидными достоинствами РЛС ДО являются:

- широкий сектор обзора пространства, что обеспечивает существенные поисковые возможности в части ИСЗ;
- всепогодность и всесуточность получения измерений.

К недостаткам РЛС ДО можно отнести сравнительно низкую точность измерений ТНП ИСЗ по сравнению с НОС и КОС (среднеквадратического отклонение (СКО) в десятки и сотни метров).

Таким образом, средства рассматриваемых типов обладают взаимодополняющими характеристиками, обобщение которых позволило бы проводить всесуточные всепогодные измерения ТНП неманеврирующих ИСЗ и вести их каталог с точностями, соответствующими разбросу по координатам в пределах десятков сантиметров. При этом РЛС ДО обладают возможностями по оперативному выявлению орбитальных маневров низкоорбитальных ИСЗ, что необходимо для функционирования СОРУК.

Измерения, погрешности которых отличаются более чем на порядок, будем называть существенно неравноточными. Так, НОС и КОС обладают прецизионной точностью измерений, которая по величине СКО превосходит точность РЛС ДО от двух до пяти порядков. При обобщении результатов существенно неравноточных измерений возникает противоречие между методами формирования опорной орбиты ИСЗ, полученной по результатам измерений РЛС ДО, и необходимым условием попадания опорной орбиты в область разброса оценок ТНП при проведении сеанса измерений НОС (КОС) для их совместной обработки. Данное противоречие проиллюстрировано на рис. 2.

Штриховыми линиями показаны расчетные орбиты, полученные по результатам измерений в первом и втором сеансах, которые в общем случае не пересекаются и не совпадают с истинной орбитой ИСЗ (сплошная линия).

Для дальнейших вычислений введем понятия комбинирования и комплексирования неравноточных измерений. Под комбинированием неравноточных измерений будем понимать обобщение результатов измерений одной величины или совокупности нескольких взаимосвязанных величин, проводимых разными по точности или применяемым методам или средствам измерений, а также измерений, разнесенных по времени проведения, если они не формируют

статистику (многократное повторение опыта в одинаковых условиях). Комбинирование основано на сочетании разных методов или принципов работы на базе установленного метода. Под комплексированием неравноточных измерений будем понимать обобщение результатов всех полученных измерений одной и той же величины, полученных разными средствами. Целью комплексирования является объединение различных датчиков в единый комплекс, обладающий существенно более высокими характеристиками точности, помехоустойчивости и надежности измерений по сравнению с отдельными измерителями [15, 16].

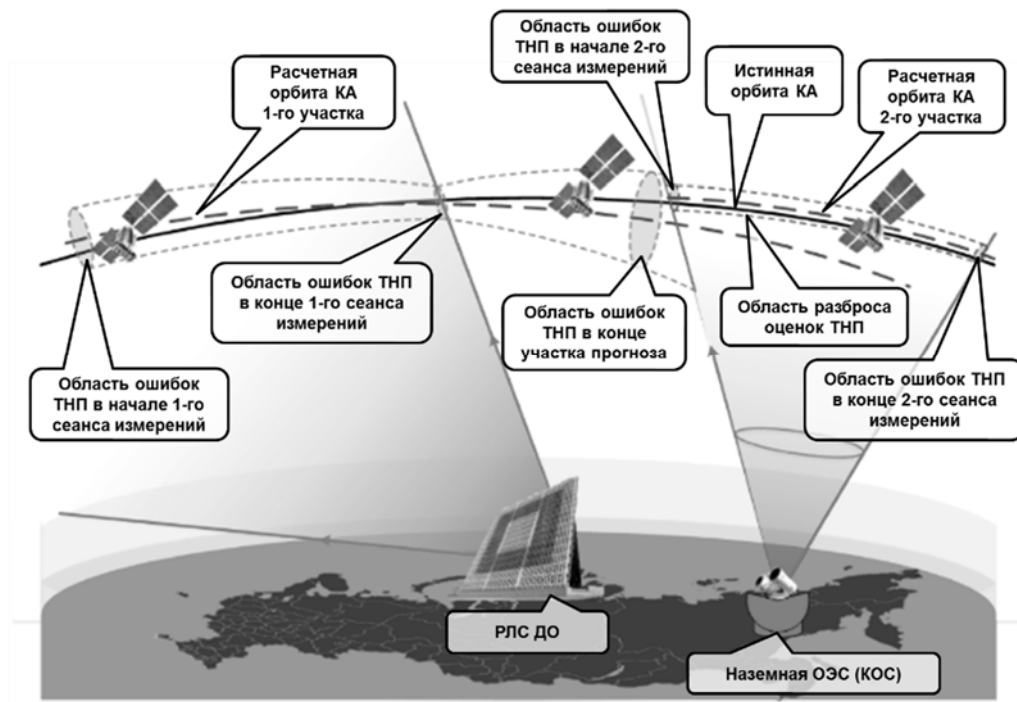


Рис. 2. Схема формирования полей ошибок и прогнозов ТНП ИСЗ при проведении разнесенных по времени неравноточных измерений ТНП ИСЗ с привлечением РЛС ДО и НОС (КОС)

В этом случае отличие комбинирования от комплексирования заключается в том, что при комплексировании в итоговом результате обязательно учитываются все полученные результаты измерений одних и тех же величин, а при комбинировании производится выборочный учет результатов измерений на основе принятого метода.

Далее показано, что для применения метода комбинирования необходимо определить пороговые значения погрешностей измерений.

Определение пороговых значений погрешностей для применения метода комбинирования текущих навигационных параметров спутников

Выбор пороговых значений связан с самим понятием существенно неравноточных измерений ТНП ИСЗ. Фактически порог, при котором происходит переход от комбинирования к комплексированию неравноточных измерений, будет определяться соотношением величин СКО различных средств измерений.

Для установления величины порога используем известные положения теории вероятностей [17, 18]. Характеристикой, позволяющей считать событие практически достоверным, т.е. имеющим высокую вероятность наступления, является доверительная вероятность β . Считается, что случайная величина (в нашем случае – результаты сеанса измерений или прогноза ТНП ИСЗ на момент времени t) попадает в определенный ей доверительный интервал значений, совместимый с опытными данными и не противоречащий им, с соответствующей доверительной вероятностью. В качестве нижнего порогового значения доверительной вероятности обычно принимают величину $\beta_{\text{пор}} = 0,9$. Величина доверительной вероятности для требуемой точности и надежности оценок ТНП ИСЗ определяется выбранным размером доверительного интервала.

Таким образом, в качестве порогового значения вероятности непопадания случайной величины в пределы доверительного интервала будет $(1 - \beta_{\text{пор}})$, в нашем случае 0,1. Эта величина является вероятностью события, при наступлении которого измерения ТНП ИСЗ можно считать недостоверными, поэтому в некоторых источниках именно эту величину считают уровнем значимости или порогом достоверности опытных данных.

На рис. 2 изображен момент начала участка измерений НОС (КОС) (второго сеанса измерений), на котором происходит скачкообразное изменение доверительного интервала оцениваемых ТНП ИСЗ. Размер доверительного интервала в этой точке со стороны участка прогноза определяется величинами СКО прогноза, а размер доверительного интервала со стороны участка измерений определяется инструментальной погрешностью НОС (КОС). При этом подлежат оценке одни и те же случайные величины – ТНП ИСЗ в рассматриваемой точке. Это позволяет рассматривать область инструментальной погрешности НОС (КОС) по каждому ТНП ИСЗ как новую границу доверительного интервала случайной величины, имеющей распределение с параметрами, соответствующими окончанию участка прогноза. Тогда характеристикой достоверности прогноза ТНП ИСЗ в этой точке будет доверительная вероятность попадания ТНП ИСЗ в доверительный интервал, ограниченный областью инструментальной погрешности НОС (КОС). Очевидно, что если рассматриваемая доверительная вероятность будет меньше величины $(1 - \beta_{\text{пор}})$, то с этого момента можно считать данные прогноза недостоверными. Это позволяет при совместной обработке результатов полностью исключить эти данные из рассмотрения, так как комплексирование достоверных данных с недостоверными не имеет смысла.

Применим данный подход для определения порогов $\varepsilon_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_{\text{п}})$ и $\varepsilon_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_{\text{и}})$. Считая оценки ТНП ИСЗ распределенными по нормальному закону, границы доверительного интервала для каждого элемента вектора ТНП ИСЗ

$$\vec{X} = [x, y, z, V_x, V_y, V_z, t]^T, \quad (1)$$

где V_x, V_y, V_z – текущие компоненты вектора мгновенной скорости ИСЗ в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК); x, y, z – текущие компоненты радиус-вектора ИСЗ в АГЭСК; t – момент времени по шкале UTC, на который получен данный вектор $\vec{X}$.

С учетом вектора погрешностей

$$\vec{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{V_x}, \sigma_{V_y}, \sigma_{V_z}, \sigma_t]^T, \quad (2)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{V_x}, \sigma_{V_y}, \sigma_{V_z}, \sigma_t$ – СКО соответствующих компонент вектора $\vec{X}$, включая СКО привязки к шкале времени σ_t ; можно представить в виде [19]

$$I_{\beta} = (\tilde{m} - t_{\beta} \sigma_{\tilde{m}}; \tilde{m} + t_{\beta} \sigma_{\tilde{m}}), \quad (3)$$

где I_{β} – ширина доверительного интервала для оценки рассматриваемого параметра ТНП ИСЗ; $\tilde{m}$ – усредненная оценка математического ожидания (МО) рассматриваемого параметра ТНП ИСЗ; $\sigma_{\tilde{m}}$ – СКО рассматриваемого параметра ТНП ИСЗ; t_{β} – гарантийный коэффициент.

Гарантийный коэффициент t_{β} показывает количество раз, которое необходимо отложить СКО рассматриваемого параметра ТНП ИСЗ $\sigma_{\tilde{m}}$ вправо и влево от $\tilde{m}$ для того, чтобы вероятность его попадания в интервал I_{β} равнялась β .

Значение гарантийного коэффициента t_{β} в точке начала участка измерений НОС (КОС) (рис. 2) для параметров распределения оценок ТНП ИСЗ на участке прогноза определяется выражением

$$t_{\beta} = \frac{\sigma_{\tilde{m}1}}{\sigma_{\tilde{m}2}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\tilde{m}1}$ – СКО оценки ТНП ИСЗ на участке прогноза; $\sigma_{\tilde{m}2}$ – СКО оценки ТНП ИСЗ на участке измерения.

Для определения порогов $\varepsilon_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_{\text{п}})$ и $\varepsilon_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_{\text{и}})$ необходимо определить некоторое пороговое значение $t_{\beta_{\text{пор}}}$, соответствующее границе доверительной вероятности $\beta_{\text{пор}}$ и порога достоверности $(1 - \beta_{\text{пор}})$ в качестве аргумента нормальной функции распределения Φ^* . Очевидно, что

значение $t_{\text{пор}}$ не зависит от параметров распределения оценки ТНП ИСЗ ($\tilde{m}, \sigma_{\tilde{m}}$), а определяется величиной установленного порога доверительной вероятности ($1 - \beta_{\text{пор}}$) и положением границ доверительного интервала (рис. 3).

Таким образом, вычисление пороговых значений погрешностей $\vec{\varepsilon}_{\text{пор}1,2}$ для применения метода комбинирования ТНП ИСЗ сводится к определению порогового значения гарантийного коэффициента $t_{\text{пор}}$, при котором оценки параметров ТНП ИСЗ можно считать недостоверными.

Для нормальной функции распределения вычислены значения гарантийного коэффициента, соответствующие наиболее востребованным величинам доверительной вероятности (например: 0,9; 0,95; 0,997). Они встречаются в литературе в табличной форме.

Если оценки МО, полученные на участках прогноза и измерения, совпадают ($\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$), а дисперсии отличаются на порядок, то даже в этом случае значение доверительной вероятности распределения ТНП ИСЗ в рассматриваемой точке скачкообразно уменьшается с 0,9 до 0,135 для $t_{\beta} = 1$ (на интервале $\pm 1 \sigma_{\tilde{m}}$) и с 0,997 до 0,236 для $t_{\beta} = 3$ (на интервале $\pm 3 \sigma_{\tilde{m}}$).

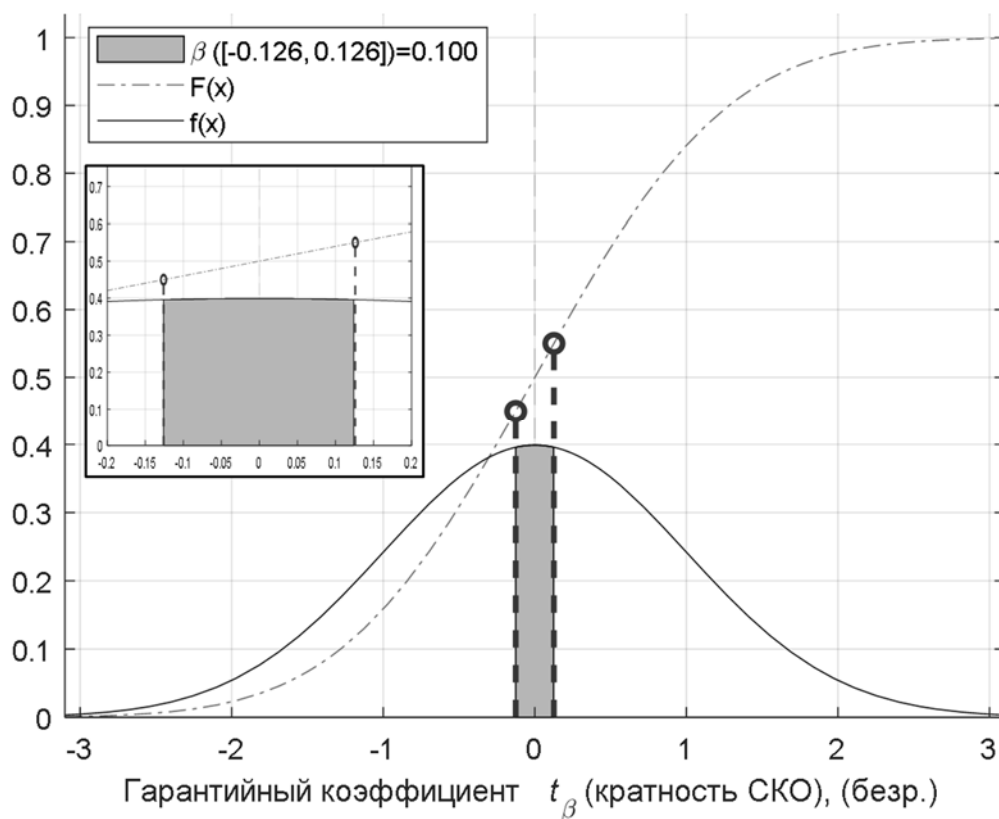


Рис. 3. Зависимость доверительной вероятности от гарантийного коэффициента для нормального закона распределения

В случае, если границы интервала вероятности, ограниченного величинами СКО измерений НОС (КОС), в точке начала участка измерений НОС (КОС) не покрывают оценку МО $\tilde{m}_1$, соответствующего окончанию участка прогноза ТНП ИСЗ, то, как было показано ранее, такая оценка считается недостоверной по определению. Так, на рис. 3 оценка МО $\tilde{m}_1$ участка прогноза ТНП ИСЗ (левая штриховая линия) в точке начала участка измерений НОС (КОС) не попадает в границы интервала, ограниченного величинами СКО измерений НОС (КОС). Очевидно, что для всех случаев, когда МО $\tilde{m}_1$ участка прогноза ТНП ИСЗ не совпадает с МО $\tilde{m}_2$ участка измерения ТНП ИСЗ, вероятность попадания оценки ($\tilde{m}_1; \sigma_{\tilde{m}1}$) прогноза ТНП ИСЗ в интервал погрешностей измерений НОС (КОС) ($\tilde{m}_2 - t_{\beta} \sigma_{\tilde{m}2}; \tilde{m}_2 + t_{\beta} \sigma_{\tilde{m}2}$), не симметричный относительно $\tilde{m}_1$, будет меньше, чем для случая $\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$, что снижает достоверность таких прогнозов. Качественно изменение вероятности события при смещении центра интервала вычисления вероятности относительно МО показано на рис. 4.

Таким образом, описанную ранее пороговую доверительную вероятность $(1 - \beta_{\text{пор}})$, введенную для случая $\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$, можно считать наименее достоверной при совместной обработке результатов неравноточных измерений. Во всех остальных случаях по критерию достоверности выбраковка оценок ТНП ИСЗ, полученных разными средствами, будет иметь более высокую вероятность наступления, чем для случая $\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$, что позволяет рассматривать в качестве порогового именно этот случай. Следовательно, значение $t_{\beta\text{пор}}$ будем искать применительно к условию $\tilde{m}_1 = \tilde{m}_2$ для заданного уровня пороговой доверительной вероятности $(1 - \beta_{\text{пор}})$.

Выражение для нахождения $t_{\beta}(\beta)$ через нормальную функцию имеет вид

$$t_{\beta} = \arg \Phi^* \left(\frac{1 + \beta}{2} \right), \quad (5)$$

где $\arg \Phi^*(x)$ – функция, обратная $\Phi^*(x)$, т.е. такое значение аргумента, при котором нормальная функция распределения равна x .

Современные средства компьютерного моделирования позволяют получить зависимость $t_{\beta}(\beta)$ как в аналитической, так и в табличной форме для любых значений β . Для нахождения порогового значения $t_{\beta\text{пор}}$ может быть использован любой из предложенных подходов, а также подбор значений. На рис. 4 показан результат получения оценки гарантийного коэффициента для доверительной вероятности, равной 0,1, на основе рассмотрения нормальной функции и плотности вероятности путем подбора значений.

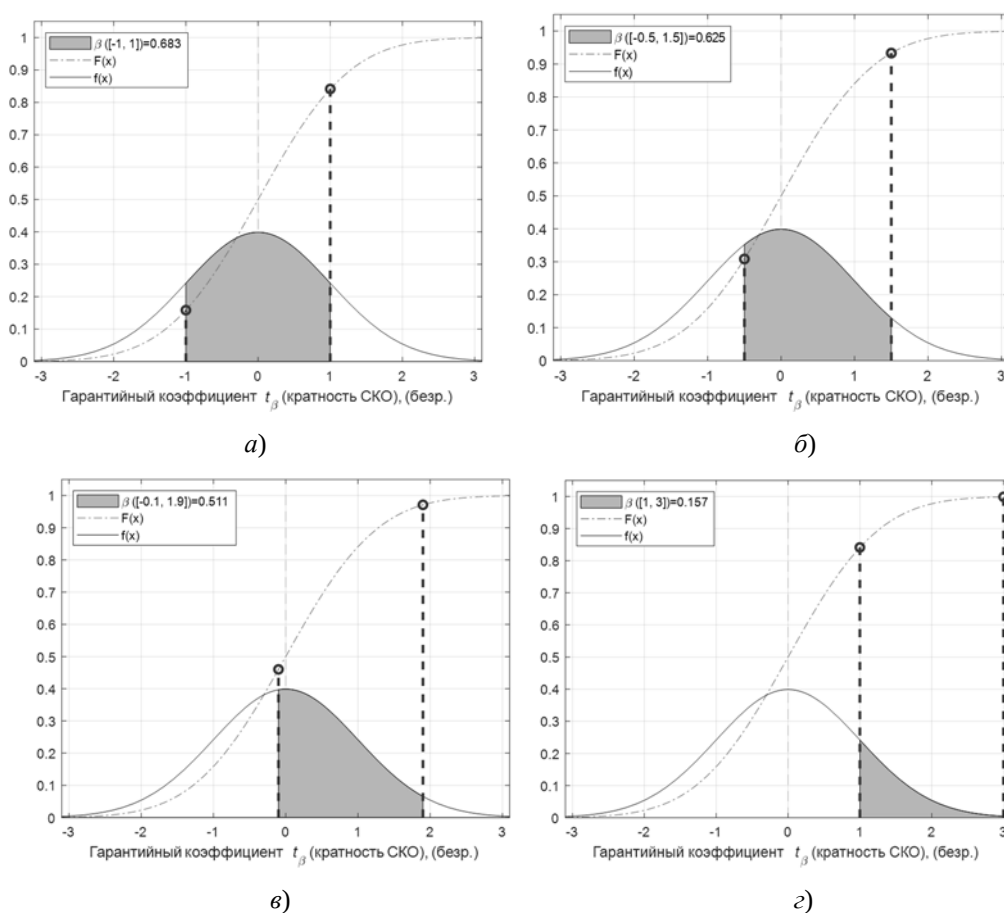


Рис. 4. Изменение вероятности события при смещении центра интервала вычисления вероятности относительно МО:

а – без смещения; б – смещение центра на 0,5; в – смещение центра на 0,9; г – смещение центра на 2

График функции $t_{\beta}(\beta)$, обратной интегральной функции Лапласа и устанавливающей зависимость гарантийного коэффициента от величины доверительной вероятности, приведен на рис. 5 (сплошная линия). Зависимость получена путем кусочно-линейной аппроксимации на основе вычисленных значений функции $\beta(t_{\beta})$, отложенных по осям абсцисс и ординат

для функции $t_\beta(\beta)$. Для сравнения, на этом же рисунке приведены графики функций вида $f(x) = -\ln(-x)$ (штриховая линия) и $f(x) = |(-x)^{-a}|$ (штрих-пунктирная линия), с помощью которых получить аппроксимацию функции $t_\beta = \arg \Phi^*(\beta)$ на рассматриваемом интервале с приемлемым качеством не удастся. По графику также можно оценить пороговое значение $t_{\beta_{\text{пор}}} = 0,126$ для требуемого уровня значимости $(1 - \beta_{\text{пор}}) = 0,1$, которое совпадает с приведенным на рис. 5.

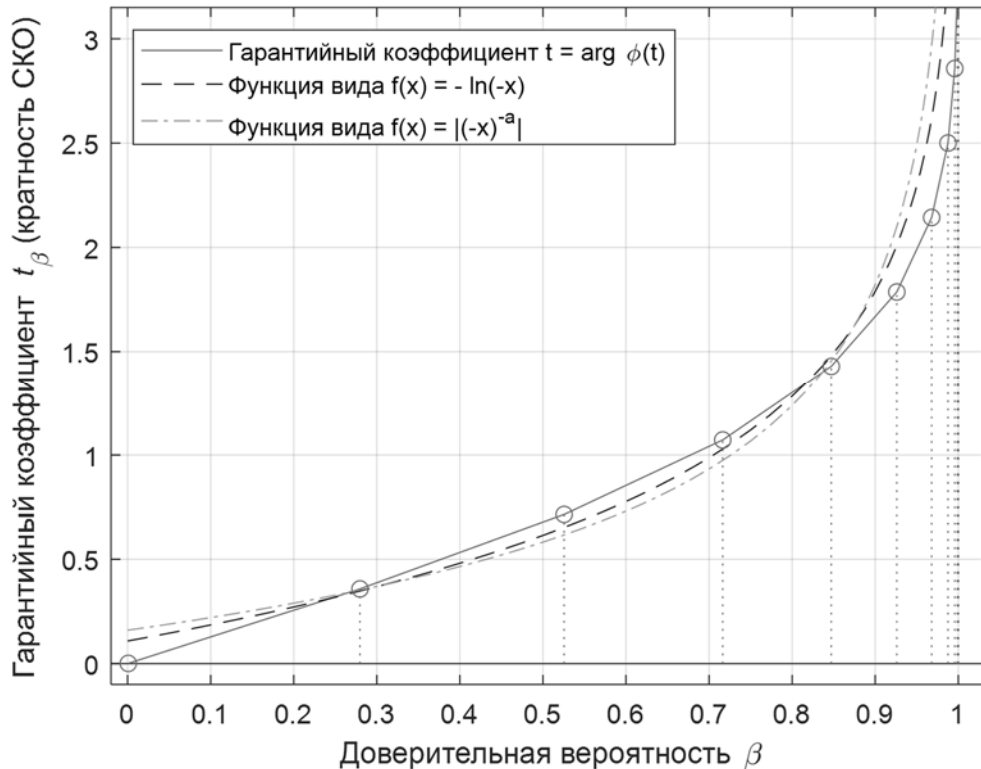


Рис. 5. Зависимость гарантийного коэффициента от величины доверительной вероятности в виде кусочно-линейной аппроксимации функции $t_\beta = \arg \Phi^*(\beta)$ и функций вида $f(x) = -\ln(-x)$ (штриховая линия) и $f(x) = |(-x)^{-a}|$ (штрих-пунктирная линия)

С помощью аппроксимации функции $t_\beta = \arg \Phi^*(\beta)$ можно составить таблицу значений гарантийного коэффициента в зависимости от доверительной вероятности или уровня значимости (порога достоверности) с произвольным шагом. Нахождение аналитического выражения непосредственно для функции $t_\beta(\beta)$ не является целью данной работы.

Таким образом, установлена зависимость между пороговой величиной доверительной вероятности $\beta_{\text{пор}}$ (или значения $(1 - \beta_{\text{пор}})$) и соответствующим значением гарантийного коэффициента $t_{\beta_{\text{пор}}}$. Используя выражение (4), можно получить значения векторов пороговых значений погрешностей $\vec{\epsilon}_{\text{пор}1,2}$ для оценок ТНП ИСЗ, которые формируются при переходе с одного участка формирования опорной орбиты (участка измерений или прогноза) на другой при известных векторах оценок погрешностей ТНП ИСЗ $\vec{\sigma}_и$ и $\vec{\sigma}_п$. Вектора оценок погрешностей ТНП ИСЗ $\vec{\sigma}_и$ и $\vec{\sigma}_п$ формируются на основе модели движения спутника для участков прогноза и на основе точностных характеристик средств измерений (РЛС или НОС (КОС)) для участков измерений, поэтому могут считаться априорно известными. Это позволяет рассчитывать значения векторов пороговых значений погрешностей $\vec{\epsilon}_{\text{пор}1,2}$ для оценок ТНП ИСЗ на любой момент времени t на основе априорных данных, используя выражение (4) для каждой компоненты вектора погрешностей.

Если считать уровень значимости $(1 - \beta)$ доверительной вероятностью события, заключающегося в непопадании оценки ТНП ИСЗ в пределы вновь установленного доверительного интервала на границе участков измерений и прогноза, то ему также может быть поставлено в соответствие значение гарантийного коэффициента с использованием приведенных зависимостей.

Для выбора порогового значения $\beta_{\text{пор}}$ по достоверности в табл. 1 приведены некоторые значения доверительной вероятности β , ширины доверительного интервала I_β , а также уровня значимости $(1 - \beta)$ и значения гарантийного коэффициента t_β , соответствующие уровню значимости.

Таблица 1

β	0,5	0,9	0,95	0,997
I_β	1,35 σ ($\pm 0,675\sigma$)	3,286 σ ($\pm 1,643\sigma$)	3,92 σ ($\pm 1,96\sigma$)	6 σ ($\pm 3\sigma$)
$1 - \beta$	0,5	0,1	0,05	0,003
t_β	0,675	0,126	0,063	0,004

В табл. 1 представлены значения доверительной вероятности β , ширины доверительного интервала I_β , уровня значимости $(1 - \beta)$ и соответствующие ему значения гарантийного коэффициента t_β . Серым цветом выделено значение доверительной вероятности 0,9, выбранного ранее в качестве примера. Очевидно, что если отношение СКО $\vec{\sigma}_и$ и $\vec{\sigma}_п$ (4) меньше порогового значения $t_\beta = 0,126$, то согласно методу комбинирования

$$\vec{X}_\Sigma = \begin{cases} \vec{X}_и, & \text{если ИСЗ сманивировал;} \\ \vec{X}_и, & \text{если } |\vec{\sigma}_и| < \vec{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п); \\ \vec{X}_п, & \text{если } |\vec{\sigma}_п| < \vec{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и); \\ F(\vec{X}_и, \vec{X}_п), & \text{если } |\vec{\sigma}_и| \geq \vec{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п) \vee |\vec{\sigma}_п| \geq \vec{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и), \end{cases} \quad (6)$$

где $\vec{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п)$ – пороговое значение, зависящее от $\vec{\sigma}_п$; $\vec{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и)$ – пороговое значение, зависящее от $\vec{\sigma}_и$; $F(\vec{X}_и, \vec{X}_п)$ – функциональная зависимость комплексирования векторов измеренных и спрогнозированных ТНП ИСЗ при соизмеримых величинах погрешностей измерений и прогноза;

$$\vec{\sigma}_\Sigma = \begin{cases} \vec{\sigma}_и, & \text{если ИСЗ сманивировал;} \\ \vec{\sigma}_и, & \text{если } |\vec{\sigma}_и| < \vec{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п); \\ \vec{\sigma}_п, & \text{если } |\vec{\sigma}_п| < \vec{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и); \\ G(\vec{\sigma}_и, \vec{\sigma}_п), & \text{если } |\vec{\sigma}_и| \geq \vec{\epsilon}_{\text{пор1}}(\vec{\sigma}_п) \vee |\vec{\sigma}_п| \geq \vec{\epsilon}_{\text{пор2}}(\vec{\sigma}_и), \end{cases} \quad (7)$$

где $G(\vec{\sigma}_и, \vec{\sigma}_п)$ – функциональная зависимость комплексирования векторов погрешностей измерений и прогноза ТНП ИСЗ при соизмеримых величинах погрешностей измерений и прогноза.

В качестве результирующего значения ТНП ИСЗ выбирается наиболее точное, т.е. то, которому соответствует наименьшая величина оценки погрешности $\vec{\sigma}_{\text{min}}$.

Если результат вычисления выражения (4) больше или равен пороговому значению $t_\beta = 0,126$, то, согласно методу комбинирования (6) и (7), требуется выполнить комплексирование оценок результатов измерений $\vec{\sigma}_и$ и прогноза $\vec{\sigma}_п$ ТНП ИСЗ с использованием известных методов совместной обработки, самым распространенным из которых является метод наименьших квадратов [3, 6].

Для рассматриваемого случая $\beta_{\text{пор}} = 0,9$ можно сделать вывод, что комплексирование оценок ТНП ИСЗ выполняется только в случае, когда погрешности оценок ТНП ИСЗ $\vec{\sigma}_и$ и $\vec{\sigma}_п$ различаются не более чем на порядок ($t_{\beta_{\text{пор}}} \approx 0,1$). При ужесточении порогового значения доверительной вероятности $\beta_{\text{пор}} = 0,997$ эти погрешности должны различаться не более чем на три порядка ($t_{\beta_{\text{пор}}} = 0,004$). При невыполнении данных условий применение комплексирования для обобщения несопоставимых по точности оценок ТНП ИСЗ гарантированно приводит к получению недостоверных результатов.

Изменение требований по пороговому значению $t_{\beta_{\text{пор}}}$ объясняется соответствующим изменением доверительного интервала I_β : чем шире доверительный интервал, тем менее жесткие требования предъявляются к пороговому критерию для комплексирования.

Заключение

При невыполнении условий (6) и (7) с учетом порога, полученного с использованием выражения (4), применение комплексирования для обобщения несопоставимых по точности оценок ТНП ИСЗ гарантированно приводит к получению недостоверных результатов.

Реализация данного подхода в СОРУК позволит обеспечить выполнение требований, предъявляемых к информационному обеспечению системы оперативного реагирования на опасные ситуации в ОКП, по точности и оперативности за счет комбинирования информации о космической обстановке с низкоточных измерительных средств, обладающих более высокой оперативностью и дающих большой поток измерений, и высокоточных средств, обладающих при этом существенно более низкой пропускной способностью.

Кроме того, установлено, что существует предел по достоверности для соотношения погрешностей величин при их совместной обработке, выше которого результат комплексирования становится гарантированно недостоверным. В статье величина данного предела определена для случая нормального распределения.

Список литературы

1. Калюта А. Н. Глобальный мониторинг космической обстановки – важнейшее направление обеспечения военной безопасности Российской Федерации в воздушно-космической сфере // Военная мысль. 2017. № 9. С. 5–11. EDN: ZHTPCB
2. Солнцев А. М., Ключня А. Ю. Применение противоспутникового оружия: международно-правовые проблемы // Обозреватель. 2013. № 3. С. 57–73. EDN: PVYRNT
3. Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190–255. doi: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255 EDN: QMOLDV
4. Barkova M. E., Zhukov A. O., Kartsan I. N. [et al.] Designing a Robotic Vehicle for Recycling Space Debris // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2024. Vol. 53, № 2. P. 157–163. doi: 10.1134/S105261882402002X EDN: GDSNFZ
5. Ключников В. Ю. Синдром Кесслера: будет ли закрыта дорога в космос? // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 4. С. 32–43. doi: 10.30981/2587-7992-2021-109-4-32-43 EDN: XVTCLR
6. Агапов В. М., Головкин А. В., Емельянов В. А. [и др.]. Космический мусор. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора. М.: Физматлит, 2014. 245 с. EDN: UGLCWD
7. Левин К. Л., Рябokonь Д. В., Мартынов В. А. [и др.]. Расчет орбиты летательного аппарата с использованием функции Лагранжа для решения упрощенных задач орбитальной механики при рассмотрении двигателя постоянной тяги // Вестник Псковского государственного университета. Сер.: Естественные и физико-математические науки. 2022. Т. 15, № 3. С. 60–68. EDN: BWLTXX
8. Олейников И. И., Архипов С. А., Тунгушпаев А. Т. Перспективная космическая система наблюдения космических объектов в околоземном космическом пространстве оптико-электронными средствами // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 4. С. 14–20. doi: 10.18127/j00338486-202303-03 EDN: GTLNTL
9. Коблов С. В., Макаров Ю. Н., Ступак Г. Г. Пути развития Российской автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2022. № 683. С. 232–237. EDN: OUWGGW
10. Макаренко В. В., Какаев В. В., Степенко А. С. Определение состояния космического объекта в многопозиционной информационной системе на основе решения задачи Радона // Электромагнитные волны и электронные системы. 2022. Т. 27, № 5. С. 57–64. doi: 10.18127/j5604128-202205-08 EDN: AUMQHN
11. Кущенко К. И., Железняков Ю. В., Волощук А. В. [и др.]. Применение нейронной сети в решении задач распознавания и классификации космических аппаратов по их оптическим изображениям // Космические аппараты и технологии. 2023. Т. 7, № 1. С. 51–59. doi: 10.26732/j.st.2023.1.06 EDN: WNREKS
12. Логунов С. В., Куприянов Н. А. Методика ранжирования каталогизированных космических объектов, используемых для повышения точности определения координат объектов радиолокационной станцией дальнего обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2019. № 1. С. 75–84. EDN: ZBNECD
13. Куприянов Н. А., Логунов С. В., Хегай Д. К. [и др.]. Модель оценивания информативности высокоширотного траекторного измерительного комплекса // Научные технологии. 2021. Т. 22, № 3. С. 89–97. doi: 10.18127/j19998465-202103-10 EDN: YJIEYL
14. Благодыренко Е. В., Куприянов Н. А., Логунов С. В. [и др.]. Метод комбинирования неравноточных измерений параметров движения маневрирующих спутников с целью достижения наилучших точности и достоверности их прогноза // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 14–24. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-2 EDN: BXDCMS

15. Благодыренко Е. В., Горбенков С. П., Царев С. М., Шосталь В. Ю. Комбинирование неравноточных измерений параметров движения маневрирующих космических объектов // СПБНТОРЭС : тр. ежегодной науч.-техн. конф. 2022. № 1. С. 56–58. EDN: DPTFXG
16. Кондыбаев Н. С., Куприянов Н. А., Куракин С. З. Алгоритм траекторной обработки информации радиолокационных измерительных комплексов на основе кластеризации методом K-MEANS // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12, № 6. С. 4–10. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-4-10 EDN: GXVCKO
17. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. 10-е изд., стер. М. : Высш. шк., 2006. 575 с.
18. Орлов А. И. Прикладной статистический анализ : учебник. М. : Ай Пи Ар Медиа, 2022. 812 с. EDN: EFUDYT
19. Благодыренко Е. В., Шосталь В. Ю. Исследование парадокса закона больших чисел при совместной обработке существенно неравноточных измерений // СПБНТОРЭС : тр. ежегодной науч.-техн. конф. 2021. № 1. С. 98–101. EDN: OCZNWW

References

1. Kalyuta A.N. Global monitoring of the space situation is the most important area of ensuring the military security of the Russian Federation in the aerospace sphere. *Voennaya mysl' = Military Thought*. 2017;(9): 5–11. (In Russ.). EDN: ZHTPCB
2. Solntsev A.M., Klyunya A.Yu. The use of anti-satellite weapons: international legal problems. *Obozrevatel' = Observer*. 2013;(3):57–73. (In Russ.). EDN: PVYRNT
3. Pekhterev S.V., Makarenko S.I., Koval'skiy A.A. Descriptive model of the Starlink satellite communication system. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control, communications and security systems*. 2022;(4):190–255. (In Russ.). doi: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255 EDN: QMOLDV
4. Barkova M.E., Zhukov A.O., Kartsan I.N. et al. Designing a Robotic Vehicle for Recycling Space Debris *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024;53(2):157–163. doi: 10.1134/S105261882402002X EDN: GDSNFZ
5. Klyushnikov V.Yu. Kessler syndrome: will the road to space be closed? *Vozdushno-kosmicheskaya sfera = The aerospace sphere*. 2021;(4):32–43. (In Russ.). doi: 10.30981/2587-7992-2021-109-4-32-43 EDN: XVTCLR
6. Agapov V.M., Golovko A.V., Emel'yanov V.A. et al. *Kosmicheskii musor. Kn. 1. Metody nablyudeniya i modeli kosmicheskogo musora = Space debris. Book 1. Observation methods and models of space debris*. Moscow: Fizmatlit, 2014:245. (In Russ.). EDN: UGLCWD
7. Levin K.L., Ryabokon' D.V., Martynov V.A. et al. Calculation of the orbit of an aircraft using the Lagrange function to solve simplified problems of orbital mechanics when considering a constant thrust engine. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki = Bulletin of Pskov State University. Ser.: Natural and physico-mathematical Sciences*. 2022;15(3):60–68. (In Russ.). EDN: BWLTXX
8. Oleynikov I.I., Arkhipov S.A., Tungushpaev A.T. A promising space system for observing space objects in near-Earth space by optical and electronic means. *Radiotekhnika = Radio engineering*. 2023;87(4): 14–20. (In Russ.). doi: 10.18127/j00338486-202303-03 EDN: GTLNTL
9. Koblov S.V., Makarov Yu.N., Stupak G.G. Ways of developing the Russian automated warning system for dangerous situations in near-Earth space. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo = Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky*. 2022;(683):232–237. (In Russ.). EDN: OUWGGW
10. Makarenkov V.V., Kakaev V.V., Stepenko A.S. Determination of the state of a space object in a multi-position information system based on solving the Radon problem. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic waves and electronic systems*. 2022;27(5):57–64. (In Russ.). doi: 10.18127/j5604128-202205-08 EDN: AUMQHN
11. Kushchenko K.I., Zheleznyakov Yu.V., Voloshchuk A.V. et al. Application of a neural network in solving problems of recognition and classification of spacecraft by their optical images. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii = Spacecraft and technologies*. 2023;7(1):51–59. (In Russ.). doi: 10.26732/j.st.2023.1.06 EDN: WNREKS
12. Logunov S.V., Kupriyanov N.A. Ranking methodology for cataloged space objects used to improve the accuracy of determining the coordinates of objects by a long-range radar station. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika teledeniya = Radio electronics issues. Ser.: Television technology*. 2019;(1):75–84. (In Russ.). EDN: ZBNECD
13. Kupriyanov N.A., Logunov S.V., Khagay D.K. et al. A model for evaluating the informativeness of a high-latitude trajectory measuring complex. *Naukoeckie tekhnologii = Science-intensive technologies*. 2021;22(3):89–97. (In Russ.). doi: 10.18127/j19998465-202103-10 EDN: YJIEYL
14. Blagodyrenko E.V., Kupriyanov N.A., Logunov S.V. et al. A method for combining non-precision measurements of motion parameters of maneuvering satellites in order to achieve the best accuracy and reliability of their forecast. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Monitoring. Management. Control*. 2024;(2):14–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-2 EDN: BXDCMS

15. Blagodyrenko E.V., Gorbenkov S.P., Tsarev S.M., Shostal' V.Yu. Combining non-precision measurements of motion parameters of maneuvering space objects. *SPbNTORES: tr. ezhegodnoy nauch.-tekhn. konf. = SPbNTORES: proceedings of annual scientific and techn. conf.* 2022;(1):56–58. (In Russ.). EDN: DPTFXG
16. Kondybaev N.S., Kupriyanov N.A., Kurakin S.Z. Algorithm of trajectory information processing of radar measuring complexes based on clustering by K-MEANS method. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = High-tech technologies in space exploration of the Earth.* 2020;12(6):4–10. (In Russ.). doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-4-10 EDN: GXVCKO
17. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey: ucheb. dlya vuzov. 10-e izd., ster. = Probability theory : textbook. for universities. 10th ed., ster.* Moscow: Vyssh. shk., 2006:575. (In Russ.)
18. Orlov A.I. *Prikladnoy statisticheskiy analiz: uchebnyk = Applied statistical analysis : textbook.* Moscow: Ay Pi Ar Media, 2022:812. (In Russ.). EDN: EFUDYT
19. Blagodyrenko E.V., Shostal' V.Yu. Investigation of the paradox of the law of large numbers in the joint processing of significantly uneven measurements. *SPbNTORES: tr. ezhegodnoy nauch.-tekhn. konf. = SPbNTORES : proceedings of annual scientific and techn. conf.* 2021;(1):98–101. (In Russ.). EDN: OCZNWW

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Владимирович Логунов

кандидат технических наук, докторант,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: skobarik83@rambler.ru

Sergey V. Logunov

Candidate of technical sciences,
doctoral student,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Евгений Васильевич Благодыренко

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры космической
радиолокации и радионавигации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: blagodyrenroev@mail.ru

Evgeny V. Blagodyrenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department
of space radar and radio navigation,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Игорь Станиславович Герасименко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры космической
радиолокации и радионавигации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: iger60@mail.ru

Igor S. Gerasimenko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of space radar and radio navigation,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Николай Александрович Куприянов

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструкции
и эксплуатации авиационной техники,
Краснодарское высшее военное авиационное
училище летчиков имени Героя Советского
Союза А. К. Серова
(Россия, Краснодарский край, г. Краснодар-5)
E-mail: sektor-ussr@rambler.ru

Nikolay A. Kupriyanov

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of aviation engineering design
and operation,
Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots
named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov
(Krasnodar-5, Krasnodar Region, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 23.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 15.07.2024

Принята к публикации / Accepted 05.08.2024

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ ТИТАНАТА БАРИЯ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Е. А. Печерская¹, У. С. Чихрина², О. В. Карпанин³, П. Е. Голубков⁴, С. А. Гурин⁵

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

^{1, 5} iit@pnzgu.ru, ² chikhulyana@yandex.ru, ³ karpanino@mail.ru, ⁴ golpavpnz@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследований выступает сегнетоэлектрическая пленка титаната бария, для получения которой авторами предложен метод микродугового оксидирования, ранее широко применяемый для развития поверхности изделий из металлов и сплавов легкой группы. Предмет исследований – параметры, характеризующие качество полученной пленки, от которых также зависят возможные направления ее использования. В представленном исследовании в качестве таких параметров рассмотрен спектральный состав, а также шероховатость поверхности. *Материалы и методы.* Для получения сегнетоэлектрической пленки титаната бария применен метод микродугового оксидирования. При этом титановая подложка погружалась в гальваническую ячейку, заполненную электролитом на основе гидроксида бария. Для измерения шероховатости использован лазерный контурграф – профилометр Mitaka PF-60. *Результаты.* Представлены результаты измерений шероховатости поверхности, а также спектрального состава титаната бария на образцах двух типов: с предварительно подготовленной в молочной кислоте подложке и необработанной подложкой из титана. *Выводы.* Определены основные параметры, характеризующие шероховатость: среднее арифметическое отклонение профиля, высота неровностей по десяти точкам, максимальная высота неровностей и другие. Шероховатость поверхности титаната бария зависит от способа его получения и обработки. Выполнен сравнительный анализ представленных экспериментальных результатов, что подтвердило повышение твердости, снижение шероховатости покрытий для подложек, которые подвергались предварительному травлению.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, измерение шероховатости, спектральный состав, титанат бария

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования» № 123091800009-1.

Для цитирования: Печерская Е. А., Чихрина У. С., Карпанин О. В., Голубков П. Е., Гурин С. А. Исследование морфологии поверхности сегнетоэлектрической пленки титаната бария, полученной методом микродугового оксидирования // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 116–122. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-13

INVESTIGATION OF THE SURFACE MORPHOLOGY OF A FERROELECTRIC BARIUM TITANATE FILM OBTAINED BY MICROARC OXIDATION

E.A. Pecherskaya¹, U.S. Chikhrina², O.V. Karpanin³, P.E. Golubkov⁴, S.A. Gurin⁵

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

^{1, 5} iit@pnzgu.ru, ² chikhulyana@yandex.ru, ³ karpanino@mail.ru, ⁴ golpavpnz@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of research is a ferroelectric film of barium titanate, for which the authors proposed a method of microarc oxidation, previously widely used for the development of the surface of products made of metals and alloys of the light group. The subject of research is the parameters characterizing the quality of the obtained film, which also determine the possible directions of its use. In the presented study, the spectral composition and surface roughness are considered as such parameters. *Materials and methods.* The method of microarc oxidation was used to obtain a ferroelectric film of barium titanate. In this case, the titanium substrate was immersed in a galvanic cell filled with an electrolyte based on barium hydroxide. A Mitaka PF-60 laser contour profiler was used to measure roughness. *Results.* The results of measurements of surface roughness and spectral composition of barium titanate on two types of samples are presented: with a substrate pre-prepared in lactic acid and an untreated titanium substrate. *Conclusions.* The main

parameters characterizing the roughness are determined: the arithmetic mean deviation of the profile, the height of the irregularities at ten points, the maximum height of the irregularities and others. The surface roughness of barium titanate depends on the method of its preparation and processing. A comparative analysis of the presented experimental results was performed, which confirmed an increase in hardness and a decrease in the roughness of coatings for substrates that were subjected to preliminary etching.

Keywords: microarc oxidation, roughness measurements, spectral composition, barium titanate

Financing: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project «Fundamentals of the digital twin of the technological process of formation of oxide coatings with specified properties by the method of microarc oxidation» No. 123091800009-1.

For citation: Pecherskaya E.A., Chikhrina U.S., Karpanin O.V., Golubkov P.E., Gurin S.A. Investigation of the surface morphology of a ferroelectric barium titanate film obtained by microarc oxidation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):116–122. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-13

Введение

Титановые сплавы обладают рядом преимуществ (высокая коррозионная стойкость, прочность), благодаря чему получили широкое распространение в авиационной и медицинской отраслях промышленности.

Титанат бария представляет собой соединение бария и титана с химической формулой BaTiO_3 . Это кристаллы, не имеющие цвета и не растворяющиеся в воде. Титанат бария получают путем сплавления оксида бария с двуокисью титана или термическим разложением гидротитаната бария. Титанат бария широко используется в различных областях. Он применяется в качестве диэлектрика при изготовлении керамических конденсаторов. Материал отличается наименьшим размытием структурного фазового перехода, что позволяет использовать его в производстве интегральных микросхем, нано- и микросистемной техники [1, 2]. Также он используется в качестве материала для пьезоэлектрических микрофонов и пьезокерамических излучателей. В оптических интегральных микросхемах тонкие пленки титаната бария могут использоваться для маршрутизации информационных потоков. Также возможно управление диэлектрической проницаемостью за счет изменения внешнего электрического поля. Недостатками в применении сплавов титана являются низкая адгезия к полимерным материалам, а также хрупкость, мешающая применять его в парах трения.

Измерение шероховатости поверхности пленки титаната бария

Шероховатость поверхности является важным параметром, который влияет на многие аспекты, включая трение, износ и адгезию изделий машино- и приборостроения. Шероховатость характеризует степень неровности поверхности. Она определяется размерами и формой неровностей поверхности материала или изделия. Основными параметрами, характеризующими шероховатость, являются среднее арифметическое отклонение профиля (R_a), высота неровностей по десяти точкам (R_z), максимальная высота неровностей ($R_{\max}$) и др. Перечисленные параметры могут быть определены посредством профилограммы поверхности (рис. 1, 2). Шероховатость поверхности титаната бария зависит от способа его получения и обработки. Обычно она составляет от 0,1 до 1 мкм. Однако точные значения могут варьироваться в зависимости от конкретного образца и требований к нему.

В работе представлены результаты измерения шероховатости поверхности титаната бария, полученные с помощью лазерного контурографа – профилометра Mitaka PF-60. Лазерная профилометрия – это метод измерения шероховатости поверхности с помощью лазера. Этот метод профилометрии имеет ряд преимуществ перед контактными методами измерения шероховатости. Во-первых, лазеры могут обеспечить очень высокую точность измерений, что делает этот метод идеальным для измерения малых неровностей поверхности. Во-вторых, процесс измерения с помощью лазера обычно занимает меньше времени по сравнению с другими методами измерений, что позволяет обрабатывать большое количество образцов за короткое время. Кроме того, данному методу присуща меньшая субъективная погрешность, поскольку результаты измерений не зависят от оператора в связи с автоматизацией процесса. Также преимуществом метода является его неразрушающее воздействие на образец исследования, поскольку лазер не повреждает и не стирает даже тонкое и неустойчивое покрытие [3, 4].

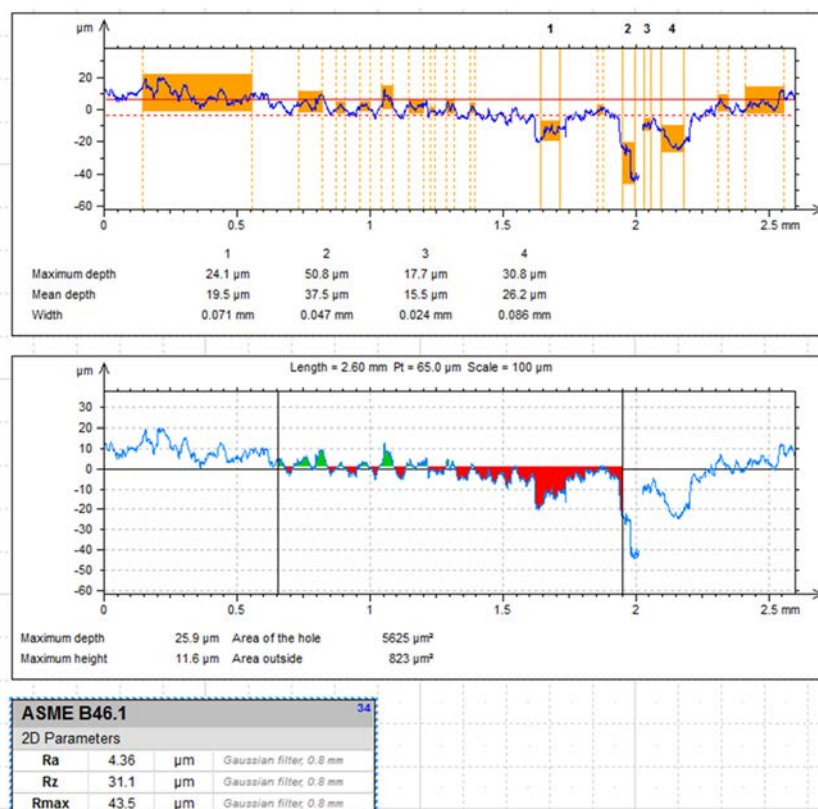


Рис. 1. Профилограмма образца покрытия титаната бария на неподготовленном образце титана

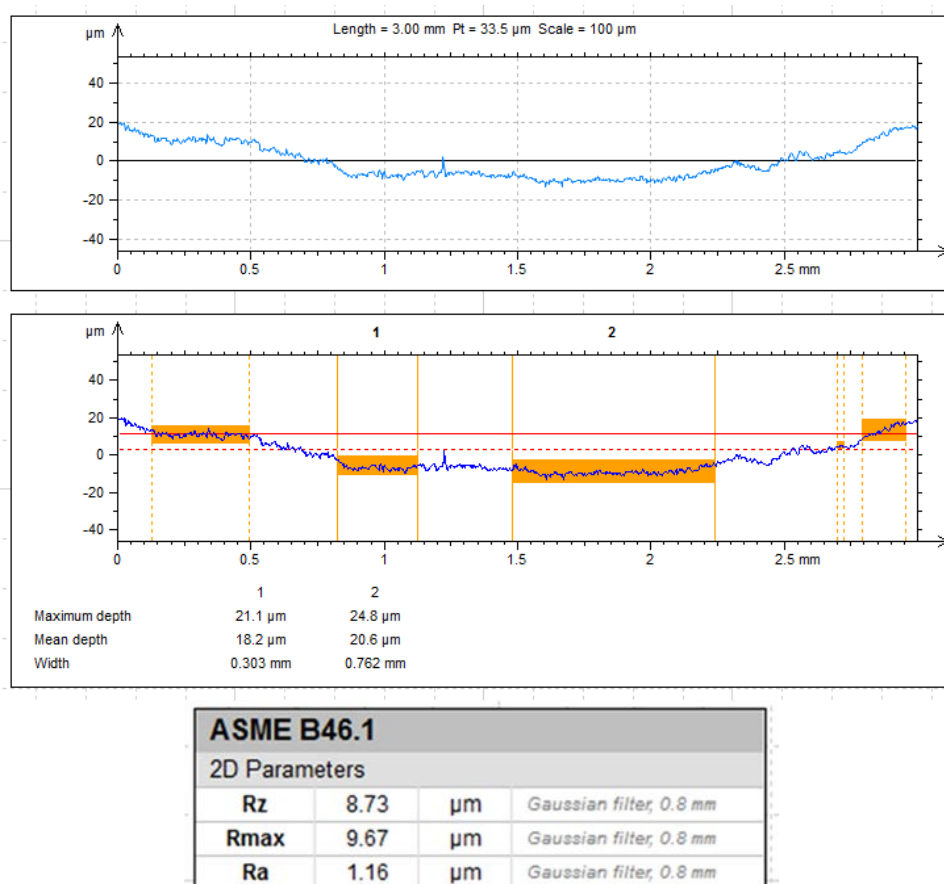


Рис. 2. Профилограмма образца покрытия на подготовленном в кислоте образце

Экспериментальное нанесение покрытия на подложку из титана производилось с помощью метода микродугового оксидирования (МДО) [5]. Процесс заключается в пропускании тока большой плотности через границу раздела металл-электролит. В результате на поверхности образца возникают разряды с высокими локальными температурами и давлениями. Этот метод открывает широкие возможности для нанесения покрытий с широчайшим спектром применения. В процессе микродугового оксидирования можно за короткое время получить стойкое равномерное покрытие, зачастую имеющее высокую адгезию [6, 7].

В первой части экспериментов образцы титана, не прошедшие обработку в молочной кислоте, погружались в электролит для нанесения пленки титаната бария. В результате было получено покрытие (рис. 1), имеющее относительно низкую прочность (легко удаляется заостренным предметом) и выраженную шероховатость. Это указывает на то, что для лучшего сцепления и увеличения адгезии нанесенного покрытия необходима предварительная обработка образца титана с целью снятия поверхностного слоя, так как требуется получить покрытие с улучшенными характеристиками [8].

Во второй части экспериментов образцы титана подвергались травлению в кислоте. Этот процесс необходим для удаления части материала с поверхности, образованию на ней микрорельефа. Травление позволяет улучшить сцепление оксидного слоя с основным материалом, тем самым сделав покрытие более прочным. Кроме того, травление может использоваться для удаления загрязнений и окислов с поверхности титана перед началом процесса микродугового оксидирования.

Травление образцов титановых пластин проводилось на протяжении двадцати минут в молочной кислоте. Реакция титана с молочной кислотой приводит к образованию соли титана и выделению углекислого газа.

В результате оксидирования было получено более стойкое покрытие с меньшей шероховатостью (рис. 2) по сравнению с покрытием, нанесенным на чистый титан. Это объясняется тем, что во время обработки кислотой удалось улучшить качество подготовки испытуемого образца [9], увеличив его шероховатость и сняв поверхностный слой¹.

Спектральный анализ полученных образцов

Был выполнен спектральный анализ двух образцов титаната бария, первый из которых не был подготовлен (рис. 3), а второй подвергся травлению в молочной кислоте (рис. 4). Спектральный анализ образца необходим для получения информации о его составе и свойствах. Этот метод позволяет определить наличие и концентрацию определенных элементов или соединений в образце, а также изучить его структуру и физико-химические характеристики. Спектроскопические методы могут обнаруживать очень маленькие количества вещества. Это делает их полезными для анализа следовых количеств элементов или соединений.

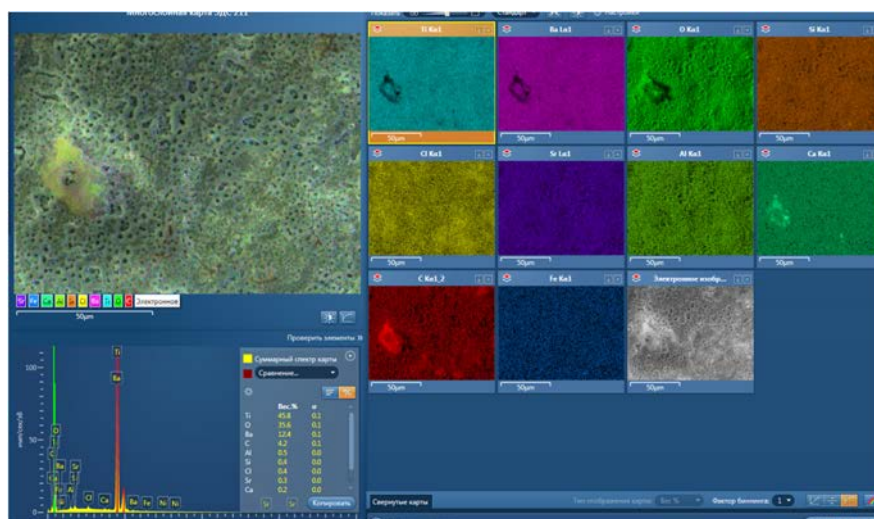


Рис. 3. Спектроскопия образца титаната бария, предварительно не обработанного в молочной кислоте

¹ ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

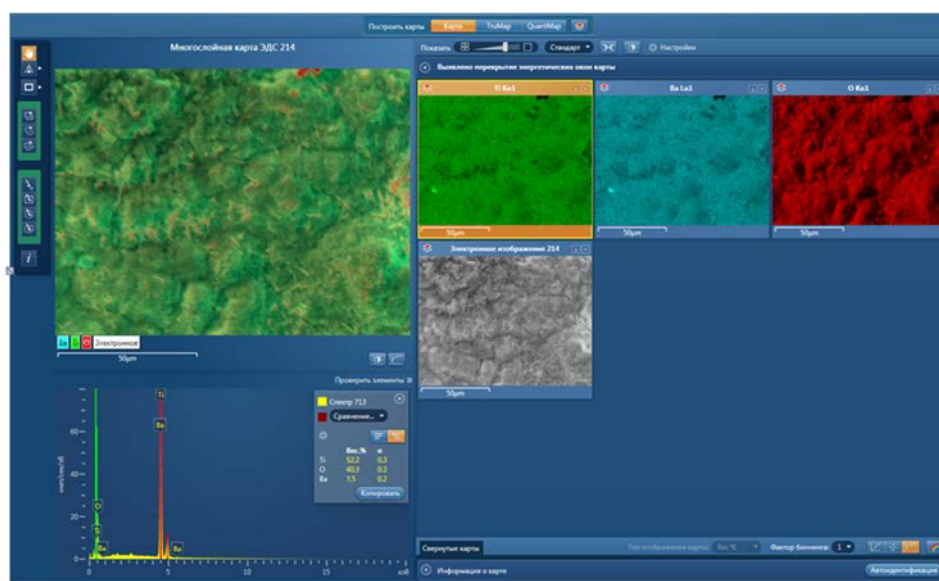


Рис. 4. Спектроскопия образца титаната бария, предварительно обработанного в молочной кислоте

В результате спектрального анализа были установлены следующие характеристики (табл. 1): процентное содержание кислорода, титана, бария образцов, которые не подвергались обработке в кислоте (образцы 1, 2) и подверженных предварительному травлению в молочной кислоте (образцы 3 и 4).

Таблица 1

Спектральный состав полученных образцов

Химический элемент	Процентное содержание химического элемента, %			
	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение
Образец № 1 (без подготовки в кислоте)				
O	37,79	36,90	37,22	0,49
Ti	48,80	48,45	48,60	0,18
Ba	14,56	13,76	14,18	0,40
Образец № 2 (без подготовки в кислоте)				
O	43,82	41,63	42,98	1,18
Ti	46,56	44,95	45,67	0,82
Ba	13,41	9,96	11,35	1,82
Образец № 3 (с подготовкой в кислоте)				
O	41,16	39,85	40,44	0,66
Ti	52,73	51,78	52,23	0,48
Ba	6,55	5,39	6,11	0,63
Образец № 4 (с подготовкой в кислоте)				
O	39,67	54,95	6,55	0,38
Ti	38,92	54,31	54,64	0,32
Ba	6,55	5,39	6,11	0,64

Заключение

Для получения сегнетоэлектрической пленки титаната бария применен метод микродугового оксидирования: титановая подложка погружена в гальваническую ячейку, заполненную электролитом на основе гидроксида бария. Образцы были получены двумя способами: без предварительной обработки подложек и с предварительным их травлением в молочной кислоте.

Представлены результаты исследования шероховатости поверхности полученных образцов посредством лазерного контурографа – профилометра типа Mitaka PF-60, а также выполнен спектральный анализ полученных пленок.

Результаты спектрального анализа показали, что концентрация титаната бария на образцах травленого титана уменьшилась более, чем в 2 раза. Это можно объяснить тем, что у бария

стало меньше центров кристаллизации. Шероховатость поверхности титаната бария зависит от способа его получения и предварительной обработки подложек. Сравнительный анализ различных образцов показал, что более высокой твердостью и низкой шероховатостью обладают покрытия на предварительно обработанных в молочной кислоте подложках.

Список литературы

1. Печерская Е. А. Метрологические аспекты исследования активных диэлектриков для микро- и наноиндустрии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 41–44.
2. Печерская Е. А. Методы и средства исследования активных диэлектриков для наноиндустрии: системный подход : монография. Пенза : Инф.-изд. центр Пенз. гос. ун-та, 2008. 130 с.
3. Кострикина И. А., Макаркин Л. А. Методика измерения шероховатости объектов высокого класса чистоты // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 1. С. 48–54.
4. Elhamshary N., Abouelatta Ossama Badie, Amar Ibrahim Mohamed, Gadelmawla Elamir. Surface Roughness Measurement Using Light Sectioning Method and Computer Vision Techniques // Mansoura Engineering Journal. 2020. Vol. 29, iss. 1. Article 20. doi: 10.21608/bfemu.2020.132820
5. Дуюнова В. А., Оглодков М. С., Герасимов М. В. [и др.]. Особенности формирования электролитно-плазменных покрытий из никельсодержащих электролитов на титановых сплавах // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-elektrolitno-plazmennyyh-pokrytiy-iz-nikelsoderzhaschih-elektrolitov-na-titanovykh-splavakh> (дата обращения: 05.10.2024).
6. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Козлов Г. В. [и др.]. Исследование влияния частоты измерительного сигнала на погрешность косвенного измерения свойств оксидных покрытий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 64–72.
7. Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В. [и др.]. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий // Известия вузов. Электроника. 2019. Т. 24, № 4. С. 363–369.
8. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный : Интеллект, 2009. 472 с.
9. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1986. 366 с.

References

1. Pecherskaya E.A. Metrological aspects of research of active dielectrics for micro- and nanoindustry. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* = *Nano- and microsystem engineering*. 2007;(7):41–44. (In Russ.)
2. Pecherskaya E.A. *Metody i sredstva issledovaniya aktivnykh dielektrikov dlya nanoindustrii: sistemnyy podkhod: monografiya* = *Methods and means of research of active dielectrics for the nanoindustry: a systematic approach : a monograph*. Penza: Inf.-izd. tsentr Penz. gos. un-ta, 2008:130. (In Russ.)
3. Kostrikina I.A., Makarkin L.A. Method of measuring the roughness of high-purity objects. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2019;(1):48–54. (In Russ.)
4. Elhamshary N., Abouelatta Ossama Badie, Amar Ibrahim Mohamed and Gadelmawla Elamir. Surface Roughness Measurement Using Light Sectioning Method and Computer Vision Techniques. *Mansoura Engineering Journal*. 2020;29(1):Article 20. doi: 10.21608/bfemu.2020.132820
5. Duyunova V.A., Oglokov M.S., Gerasimov M.V. et al. Features of the formation of electrolyte-plasma coatings from nickel-containing electrolytes on titanium alloys. *Trudy VIAM* = *Proceedings of VIAM*. 2021;(7). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-elektrolitno-plazmennyyh-pokrytiy-iz-nikelsoderzhaschih-elektrolitov-na-titanovykh-splavakh> (accessed 05.10.2024).
6. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Kozlov G.V. et al. Investigation of the effect of the frequency of the measuring signal on the error of indirect measurement of the properties of oxide coatings. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(1):64–72. (In Russ.)
7. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V. et al. Investigation of the influence of technological parameters of the microarc oxidation process on the properties of oxide coatings. *Izvestiya vuzov. Elektronika* = *Izvestiya vuzov. Electronics*. 2019;24(4):363–369. (In Russ.)
8. Uaytkhauz D. *Metrologiya poverkhnostey. Printsipy, promyshlennyye metody i pribory* = *Metrology of surfaces. Principles, industrial methods and devices*. Dolgoprudnyy: Intellekt, 2009:472. (In Russ.)
9. Pasyнков V.V., Sorokin V.S. *Materialy elektronnoy tekhniki. 2-e izd., pererab. i dop.* = *Materials of electronic technology. 2nd ed., revised and additional*. Moscow: Vyssh. shk., 1986:366. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Екатерина Анатольевна Печерская**

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Ульяна Сергеевна Чихрина

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

Ulyana S. Chikhrina

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

Олег Валентинович Карпанин

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

Oleg V. Karpanin

Head of calibration and repair service,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Павел Евгеньевич Голубков

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

Pavel E. Golubkov

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

Сергей Александрович Гурин

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории «Полет»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Sergey A. Gurin

Candidate of technical sciences,
senior researcher of the laboratory "Polet",
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 24.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 19.08.2024

Принята к публикации / Accepted 02.09.2024

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Е. А. Печерская¹, О. В. Карпанин², Д. Е. Нелюцкова³,
А. М. Метальников⁴, У. С. Чихрина⁵

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

¹ iit@pnzgu.ru, ² karpanino@mail.ru, ³ diana.tuzova.02@bk.ru, ⁴ metalnikovam@gmail.com, ⁵ chikhulyana@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время полупроводниковые структуры и приборы применяются во многих отраслях, в частности, электронике, телекоммуникациях, приборостроении. Рассматривается способ экспериментального определения их параметров посредством измерения вольт-амперных характеристик полупроводников с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы. Цель работы – исследование электрофизических параметров полупроводниковых компонентов и описание методики измерений, положенной в основу измерительной системы. *Материалы и методы.* Автоматизированная информационно-измерительная система предназначена для исследования различных полупроводниковых компонентов и изделий, таких как интегральные схемы, микросхемы, диоды, транзисторы, солнечные элементы, стабилитроны, устройства с зарядовой связью, солнечные элементы. Все эти компоненты используются в электронике, машиностроении, оптоэлектронике и системах обработки сигналов. *Результаты.* Выполнено измерение вольт-амперной характеристики на примере полупроводникового компонента (диода 2Д212Б), осуществлен анализ полученных результатов, представленных в табличном и графическом виде. *Выводы.* Представлена структура автоматизированной информационно-измерительной системы, которая содержит измерительный блок и ЭВМ, осуществляющую управление измерениями и автоматизированную обработку результатов измерений с целью определения электрофизических параметров исследуемых структур по измеренной вольт-амперной характеристике.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, автоматизация измерений, полупроводниковые компоненты, исследование диода, вольт-амперная характеристика

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

Для цитирования: Печерская Е. А., Карпанин О. В., Нелюцкова Д. Е., Метальников А. М., Чихрина У. С. Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур с помощью разработанной автоматизированной информационно-измерительной системы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 123–128. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-14

INVESTIGATION OF THE VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES USING THE DEVELOPED AUTOMATED INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM

E.A. Pecherskaya¹, O.V. Karpanin², D.E. Nelyutskova³,
A.M. Metalnikov⁴, U.S. Chikhrina⁵

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

¹ iit@pnzgu.ru, ² karpanino@mail.ru, ³ diana.tuzova.02@bk.ru, ⁴ metalnikovam@gmail.com, ⁵ chikhulyana@yandex.ru

Abstract. *Background.* Currently, semiconductor structures and devices are used in many industries, in particular electronics, telecommunications, and instrumentation. This article discusses a method for experimentally determining their parameters by measuring the volt-ampere characteristics of semiconductors using an automated information and measurement system. The purpose of the work is to study the electrophysical parameters of semiconductor components and describe the measurement technique used as the basis of the measuring system. *Materials and methods.* The automated information and measurement system is designed to study various semiconductor components and products, such as

integrated circuits, microcircuits, diodes, transistors, solar cells, zener diodes, charge-coupled devices, solar cells. All these components are used in electronics, mechanical engineering, optoelectronics and signal processing systems. *Results.* The volt-ampere characteristic was measured using the example of a semiconductor component (diode 2D212B), and the results obtained were analyzed, presented in tabular and graphical form. *Conclusions.* The structure of an automated information and measurement system is presented, which contains a measuring unit and a computer that controls measurements and automated processing of measurement results in order to determine the electrophysical parameters of the structures under study according to the measured volt-ampere characteristic.

Keywords: information and measurement system, measurement automation, semiconductor components, diode research, volt-ampere characteristic

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

For citation: Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Nelyutskova D.E., Metalnikov A.M., Chikhina U.S. Investigation of the volt-ampere characteristics of semiconductor structures using the developed automated information and measurement system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):123–128. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-14

Введение

Такие кристаллические вещества, как полупроводники, обладающие уникальными свойствами, в современном мире играют важную роль в электронике и смежных с ней областях. Из-за возможности проявлять как проводниковые, так и диэлектрические свойства полупроводники применяются для изготовления различных компонентов, изделий и приборов. Например, на их основе производят транзисторы, диоды, интегральные микросхемы, солнечные батареи [1, 2].

Самыми распространенными полупроводниковыми веществами являются германий (Ge) и кремний (Si). Кремний из-за своей доступности и электрических свойств широко используют для изготовления солнечных батарей и всех элементов микроэлектроники [5, 6]. Германий, в свою очередь, также часто используется в функциональной электронике, в основном для производства детекторов. Помимо германия и кремния для изготовления полупроводниковой продукции используют такие материалы, как селен (Se) и теллур (Te), которые хорошо подходят для реализации фотодетекторов [3].

Оптические и электрические свойства полупроводниковых соединений (арсенида галлия (GaAs), фосфида галлия (GaP), арсенида индия (InAs)) позволяют использовать их в высокочастотных устройствах – сенсоров и усилителей. Карбид кремния (SiC), обладающий стойкостью при высоких температурах и устойчивостью к химическим воздействиям, нашел свое применение в высокотемпературных и высоковольтных приложениях [4].

Производство полупроводниковой продукции обязательно включает в себя процесс измерения параметров материалов, из которых она изготавливается, так как будущие свойства изделий из полупроводников будут напрямую определяться их характеристиками. Одной из важнейших характеристик всех полупроводников является зависимость тока, протекающего в исследуемом образце, от изменяющегося напряжения (вольт-амперная характеристика). Именно она содержит информацию о параметрах объекта измерения.

Измерение вольт-амперной характеристики возможно с помощью множества средств измерений, таких как различные параметрические тестеры и анализаторы, измерители R-C-L, программные комплексы [8, 9]. В данной работе показаны измерения вольт-амперной характеристики, осуществляемые с помощью разработанной авторами автоматизированной информационно-измерительной системы.

Структура автоматизированной информационно-измерительной системы

В состав автоматизированной информационно-измерительной системы входит персональный компьютер и измерительный блок, к которому подключаются исследуемые образцы, а также специально разработанное программное обеспечение, осуществляющее анализ и обработку полученной информации. Для удобства данные об измерении могут быть представлены как в графическом, так и табличном представлении. Структура рассматриваемой системы представлена на рис. 1.

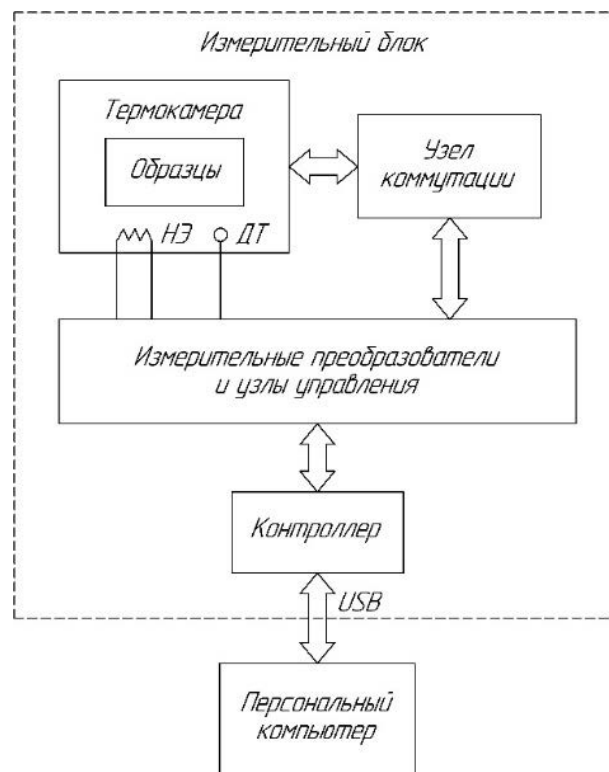


Рис. 1. Структура автоматизированной информационно-измерительной системы

Исследуемые образцы устанавливаются в термокамеру с нагревательным элементом. С помощью узла коммутации возможно переключение между несколькими исследуемыми объектами. Получение данных осуществляется измерительными преобразователями и узлами управления. Обработка информации производится контроллером и передается в персональный компьютер для дальнейшей работы [7].

Исследование вольт-амперных характеристик диффузионного диода

В качестве исследуемого образца в данной статье выступает кремниевый диффузионный диод 2Д212Б (рис. 2), обладающий следующими характеристиками:

- постоянное прямое напряжение при $I_{пр} = 1 \text{ A}$, $T = 298...398 \text{ K}$: $U_{пр}$ менее 1 В;
- постоянный обратный ток при $U_{обр} = 100 \text{ В}$, $T = 213...298 \text{ K}$: $I_{обр}$ менее 50 мкА;
- время восстановления обратного сопротивления при $I_{пр} = 1 \text{ A}$, $U_{обр} = 100 \text{ В}$: t_v менее 300 нс;
- емкость диода при $U_{обр} = 100 \text{ В}$: C_{min} менее 40 пФ.

Диод 2Д212Б предназначен для преобразования переменного напряжения повышенной частоты в постоянное электрическое напряжение.

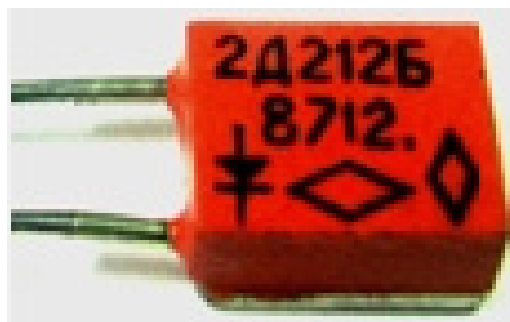


Рис. 2. Внешний вид диода 2Д212Б

В ходе исследования образца были получены результаты измерения напряжения и тока на исследуемом полупроводниковом диоде, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения напряжения и тока исследуемого полупроводникового диода

Напряжение на исследуемом образце U , В	Протекающий через исследуемый образец электрический ток I , мкА	Напряжение на исследуемом образце U , В	Протекающий через исследуемый образец электрический ток I , мкА
0,370	1,30	-1,018	0,02
0,366	1,13	-1,038	0,02
0,358	1,00	-1,059	0,02
0,352	0,84	-1,076	0,02
0,347	0,74	-1,097	0,02
0,338	0,62	-1,118	0,02
0,328	0,51	-1,139	0,02
0,318	0,40	-1,159	0,02
0,306	0,31	-1,181	0,02
0,293	0,23	-1,197	0,02
0,282	0,18	-1,218	0,02
0,266	0,13	-1,239	0,02
0,248	0,10	-1,259	0,02
0,230	0,07	-1,281	0,02
0,211	0,05	-1,302	0,02
0,191	0,04	-1,318	0,02
0,176	0,03	-1,339	0,02
0,155	0,02	-1,359	0,02
0,135	0,02	-1,381	0,02
0,114	0,02	-1,402	0,02
0,093	0,02	-1,423	0,02
0,072	0,02	-1,439	0,02
0,056	0,02	-1,460	0,02
0,035	0,02	-1,480	0,02

Графическое представление зависимости тока от напряжения, т.е. вольт-амперная характеристика диода, изображено на рис. 3.

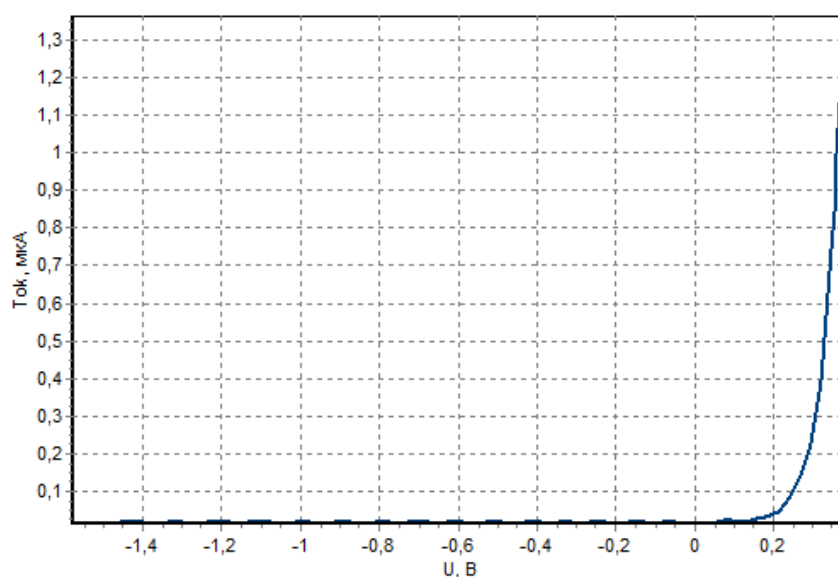


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика диода 2Д212Б

На основе вольт-амперной характеристики исследуемого объекта, в рассматриваемом примере диода 2Д212Б, можно найти другие его параметры косвенным методом измерения, а именно: проводимость, пороговое напряжение, электрическое сопротивление, температурную зависимость, границы насыщения и т.д.

Перспективным представляется применение предложенной автоматизированной информационно-измерительной системы для исследования вольт-амперных характеристик структур типа металл – диэлектрик – полупроводник (МДП-структур) [10, 11].

Заключение

Экспериментальное определение вольт-амперных характеристик целесообразно использовать для косвенного определения свойств исследуемых полупроводниковых структур. Предложена структура автоматизированной информационно-измерительной системы, содержащей измерительный блок и ЭВМ, которая посредством разработанного программного обеспечения осуществляет управление измерениями и автоматизированную обработку результатов измерений с целью определения электрофизических параметров исследуемых структур.

Список литературы

1. Rahman A. A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors. Bangladesh, Pabna : Pabna University of Science and Technology, 2014.
2. Xu B., Key Z. G., Wang Y. H. Controlled growth of III-V compound semiconductor nano-structures and their application in quantum-devices // 13th International Conference on Semiconducting and Insulating Materials (September 2004). 2004. doi: 10.1109/SIM.2005.1511398
3. Bronovets M. A., Volodin N. M., Mishin Yu. N. New materials in semiconductor tensometry // Materials Letters. 2022. Vol. 267. P. 127467
4. Anderson S., Berringer K., Romero G. [et al.]. Advanced power module using GaAs semiconductors, metal matrix composite packaging material, and low inductance design // Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics, August 2002. doi: 10.1109/ISPSD.1994.583629
5. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Golubkov P. E. [et al.]. Investigation of the properties of transparent conductive oxides produced by aerosol pyrolysis // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. T. 16. № 6. P. 1315–1321.
6. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Novichkov M. D. [et al.]. Synthesis of thin-film structures of tungsten oxide by the spray-pyrolysis method // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, № S3.1. P. 402–407.
7. Метальников А. М., Карпанин О. В., Чайкин М. С. Аппаратное и программное обеспечение автоматизированной обучающей системы для исследования вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов // Молодой ученый. 2019. № 50. С. 118–121.
8. Савин М. Л., Гришко А. К., Зуев В. Д. [и др.]. Анализ отказов полевых транзисторов при контроле работоспособности устройства по косвенным параметрам // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 91–97. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-10
9. Юрков Н. К. Синтез оптимальной структуры технической системы на основе теории межмодельного взаимодействия // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 12–17.
10. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И. [и др.]. Анализ факторов, влияющих на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 64–72.
11. Печерская Е. А., Карпанин О. В., Нелюцкова Д. Е. [и др.]. Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур и приборов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 32–40. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-4

References

1. Rahman A. A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors. Bangladesh, Pabna: Pabna University of Science and Technology, 2014.
2. Xu B., Key Z. G., Wang Y. H. Controlled growth of III-V compound semiconductor nano-structures and their application in quantum-devices. 13th International Conference on Semiconducting and Insulating Materials (September 2004). 2004. doi: 10.1109/SIM.2005.1511398
3. Bronovets M. A., Volodin N. M., Mishin Yu. N. New materials in semiconductor tensometry. Materials Letters. 2022;267:127467.
4. Anderson S., Berringer K., Romero G. et al. Advanced power module using GaAs semiconductors, metal matrix composite packaging material, and low inductance design. Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics, August 2002. doi: 10.1109/ISPSD.1994.583629
5. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Golubkov P. E. et al. Investigation of the properties of transparent conductive oxides produced by aerosol pyrolysis. Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022;16(6):1315–1321.
6. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Novichkov M. D. et al. Synthesis of thin-film structures of tungsten oxide by the spray-pyrolysis method. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023;16(S3.1):402–407.

7. Metal'nikov A.M., Karpanin O.V., Chaykin M.S. Hardware and software of an automated learning system for studying the voltage characteristics of semiconductor devices. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2019;(50):118–121. (In Russ.)
8. Savin M.L., Grishko A.K., Zuev V.D. et al. Analysis of failures of field-effect transistors when monitoring device operability by indirect parameters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):91–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-10
9. Yurkov N.K. Synthesis of the optimal structure of a technical system based on the theory of inter-model interaction. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:12–17. (In Russ.)
10. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I. et al. Analysis of factors affecting the electrophysical properties of transparent conductive coatings. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(1):64–72. (In Russ.)
11. Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Nelyutskova D.E. et al. Investigation of the volt-ampere characteristics of semiconductor structures and devices. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2024;(3):32–40. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-4

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Олег Валентинович Карпанин

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

Oleg V. Karpanin

Head of calibration and repair service,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Диана Евгеньевна Нелюцкова

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: diana.tuzova.02@bk.ru

Diana E. Nelyutskova

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

Алексей Михайлович Метальников

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: metalnikovam@gmail.com

Aleksey M. Metalnikov

Candidate of technical sciences, senior researcher,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ульяна Сергеевна Чихрина

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

Ulyana S. Chikhrina

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 15.07.2024

Поступила после рецензирования/Revised 19.08.2024

Принята к публикации/Accepted 02.09.2024

КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕДОМСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОВЕРОЧНЫХ ОРГАНОВ

А. С. Ефремов¹, Л. В. Лукичев²

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

^{1,2} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена важностью обеспечения эффективности выполнения поверочно-аттестационных работ и в связи с этим необходимостью оптимизации как структуры поверочных подразделений, так и планирования поверочных работ. Целью работы является разработка комплекса моделей построения и функционирования ведомственной системы поверочных органов, в котором учитываются основные структурные и функциональные параметры системы поверочных органов. *Материалы и методы.* Рассмотрен комплекс моделей построения и функционирования ведомственной системы поверочных органов, который состоит из ряда моделей: модель распределения работ позволяет описать распределение поверочных работ в установившемся стационарном режиме функционирования обслуживаемых объектов и поверочных органов; модель сетевого планирования позволяет описать распределение работ во времени и продолжительность выполнения работ по обслуживанию заявок; транспортная модель позволяет описать планирование способов и маршрутов доставки партий СИ в поверочные подразделения, либо маршрутов движения подвижных поверочных лабораторий; модель функционирования системы позволяет описать процессы выполнения поверочных работ в территориально распределенной ведомственной системе поверочных органов при различных вариантах построения системы, распределения и организации работ; модель расходов и доходов позволяет описать процессы расходования ресурсов при различных вариантах построения поверочных органов и организации работ. *Результаты и выводы.* Использование комплекса моделей позволит с единых позиций выполнить формализованное описание состава и функционирования территориально распределенной ведомственной системы поверочных органов, определить множество основных параметров системы и показателей качества, а также отношения между этими множествами. Рассмотренный комплекс моделей можно использовать при формировании и оценивании вариантов построения поверочных подразделений и организации поверочных работ.

Ключевые слова: комплекс моделей, средства измерений, поверочные органы, планирование проекта, оптимизация маршрута, параметры, показатели

Для цитирования: Ефремов А. С., Лукичев Л. В. Комплекс моделей построения и функционирования ведомственной системы поверочных органов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 129–138. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-15

A SET OF MODELS FOR THE CONSTRUCTION AND FUNCTIONING OF THE DEPARTMENTAL SYSTEM OF VERIFICATION BODIES

A.S. Efremov¹, L.V. Lukichev²

^{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 is determined by the importance of ensuring the efficiency of verification and certification work and, in this regard, the need to optimize both the structure of verification departments and the planning of verification work. The purpose of the work is to develop a set of models for the construction and functioning of a departmental system of verification bodies, which takes into account the main structural and functional parameters of the system of verification bodies. *Materials and methods.* The article considers a set of models for the construction and operation of a departmental system of verification bodies, which consists of a number of models: the work distribution model allows one to describe the distribution of verification works in the established stationary mode of operation of the serviced objects and verification bodies; the network planning model allows one to describe the distribution of works in time, and the duration of work on servicing applications; the transport model allows one to describe the planning of methods and routes for delivering batches of measuring instruments to verification

departments, or the routes of movement of mobile verification laboratories; the system functioning model allows one to describe the processes of performing verification works in a territorially distributed departmental system of verification bodies with various options for constructing the system, distributing and organizing works; the model of expenses and incomes allows one to describe the processes of resource expenditure with various options for constructing verification bodies and organizing works. *Results and conclusions.* The use of a set of models will allow one to perform a formalized description of the composition and operation of a territorially distributed departmental system of verification bodies, to determine a set of basic system parameters and quality indicators, as well as the relationships between these sets. The considered set of models can be used in the formation and evaluation of options for constructing verification departments and organizing verification works.

Keywords: model complex, measuring instruments, verification bodies, project planning, route optimization, parameters, indicators

For citation: Efremov A.S., Lukichev L.V. A set of models for the construction and functioning of the departmental system of verification bodies. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):129–138. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-15

Введение

Ведомственные метрологические службы создаются для решения задач по обеспечению единства и точности измерений при разработке, производстве, испытаниях и эксплуатации техники, продукции и иной деятельности. К числу задач, решаемых ведомственными метрологическими службами, относится метрологическое обслуживание средств измерений (СИ), под которым понимается комплекс мероприятий, проводимых с целью поддержания метрологических характеристик СИ в установленных пределах. Метрологическое обслуживание СИ осуществляется преимущественно силами ведомственных поверочных органов (центров метрологии, лабораторий измерительной техники, калибровочных лабораторий и пр.).

Для многих крупных ведомств характерной является территориально распределенная структура, в составе которой эксплуатируется большое число разнотипных средств измерений. С учетом этого ведомственная система метрологического обеспечения соответственно строится как территориально распределенная сеть метрологических подразделений с различными областями аккредитации и видами обслуживаемых СИ, различным оснащением, различными производственными возможностями и пр.

Анализ показывает, что подобная система представляет собой многопараметрический объект, характеризующийся множеством параметров организации системы и процессов ее функционирования. Задачи формализованного описания таких объектов, оценивания и выбора вариантов построения и функционирования характеризуются высокой размерностью, взаимозависимостью частных показателей, невозможностью нахождения в общем виде строго оптимальных решений. Выполнить всестороннее и адекватное описание такого объекта с учетом всех изменяемых параметров в рамках одной какой-либо модели не представляется возможным. Для решения таких задач представляется целесообразным использовать многомодельный подход с объединением частных моделей в единый комплекс.

Формализованная постановка задачи

Начальным этапом формализованного описания является декомпозиция рассматриваемой системы и определение состава базовых множеств и отношений между ними, описывающих формализуемые объекты и процессы [1].

Под исследуемой системой будем понимать ведомственную территориально распределенную систему поверочных органов. К объектам, оказывающим непосредственное влияние на исследуемую систему и выступающим по отношению к ней как внешняя среда, следует отнести вышестоящую по уровню иерархии систему, формирующую цели для исследуемой системы, а также существующую инфраструктуру и факторы внешней среды, в условиях которых функционирует система.

В качестве вышестоящей системы выступает совокупность N территориально распределенных объектов обслуживания, которую в обобщенном виде можно описать N -мерным вектором $O_N = (O_1, \dots, O_n, \dots, O_N)$. Каждая компонента O_n описывает параметры и характеристики подлежащих метрологическому обслуживанию средств измерений на n -м объекте и может быть представлена в виде кортежа

$$O_n = B_n, H_n, \Lambda_n, \tau_n, n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где B_n – множество параметров, характеризующих территориальное расположение объекта (например, в виде географических координат); H_n – множество, характеризующее число типов и количество СИ каждого типа на данном объекте; Λ_n – множество, характеризующее интенсивности заявок на поверку СИ каждого типа, определяемые через средние длительности межповерочных интервалов; τ_n – множество, характеризующее нормы времени на поверку СИ каждого типа.

К существующей инфраструктуре можно отнести имеющиеся средства и возможности для доставки СИ в поверочные органы, которые могут быть описаны вектором $Q_i = (Q_1, \dots, Q_i, \dots, Q_I)$. Каждая компонента Q_i описывает для i -го вида транспорта доступные направления для доставки СИ в поверочные органы и может быть представлена в виде

$$Q_i = L_i, V_i, C_i, i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

где $L = l_{nm}$, $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$ – матрица расстояний l_{nm} от n -х объектов до m -х поверочных органов для заданного вида транспорта; V – средние скорости движения транспортных средств каждого вида с учетом доступной сети дорог; C – удельные (на единицу расстояния) стоимости доставки транспортным средством каждого типа.

Внешняя среда может быть охарактеризована набором J факторов различного происхождения. К ним могут быть отнесены как естественные (температура, влажность, давление, пыль, осадки и пр.), так и искусственные (электромагнитные, вибрационные, ударные и пр.) факторы, так или иначе влияющие как на параметры обслуживаемых объектов, так и на характеристики процесса функционирования поверочных органов. В формализованном виде внешняя среда может быть описана J -мерным вектором $D_J = (D_1, \dots, D_j, \dots, D_J)$, в котором каждая компонента $D_j = P_j, W_j$ описывает параметры отдельного фактора внешней среды – вероятность P_j возникновения j -го фактора и степень его проявления (воздействия) W_j .

В качестве исследуемой системы рассматривается ведомственная распределенная система поверочных органов, характеризующая своей структурой и организацией процессов функционирования.

Структура ведомственной метрологической службы представляет собой совокупность M территориально распределенных поверочных органов, и может быть описана M -мерным вектором $Z_M = (Z_1, \dots, Z_m, \dots, Z_M)$. Каждая компонента Z_m этого вектора описывает параметры и характеристики построения (структурные параметры) поверочных органов и может быть представлена в виде

$$Z_m = B_m, G_m, M_G, m = \overline{1, M}, \quad (3)$$

где B_m – множество параметров, характеризующих территориальное расположение поверочных органов; G_m – множество, характеризующее области аккредитации и количество соответствующих им типов рабочих мест по поверке СИ в поверочном органе; M_G – множество, характеризующее интенсивности обслуживания μ_G заявок на поверку СИ на рабочих местах каждого типа, определяемые нормами времени на поверку СИ.

Организация функционирования поверочных органов в подобной системе характеризуется рядом факторов, таких как распределение заявок на поверку СИ от объектов по поверочным органам (или закрепление объектов за поверочными органами), календарная очередность поступления партий СИ на поверку в поверочные органы, способы и маршруты доставки СИ в поверочные органы и обратно. В соответствии с этим варианты организации поверочных работ могут характеризоваться вектором X , определяемым как отношение на декартовом произведении составляющих его множеств:

$$X \subseteq R \times T \times S = \{(r; t; s) | r \in R \wedge t \in T \wedge s \in S\}, \quad (4)$$

где R – множество допустимых вариантов распределения заявок на поверку СИ от всех объектов по поверочным органам; T – множество допустимых вариантов календарных планов представления партий СИ на поверку; S – множество допустимых вариантов маршрутов доставки партий СИ в поверочные органы и обратно; r, t, s – соответственно элементы множеств R, T и S , а $x = (r; t; s)$ – вариант организации поверочных работ из множества вариантов X ($x \in X$).

Качество построения и функционирования рассматриваемой системы, включающей территориально распределенные обслуживаемые объекты и поверочные подразделения ведомственной метрологической службы, целесообразно оценивать по совокупности показателей технико-экономической эффективности, включающей показатели результативности, оперативности и ресурсоемкости $Y = (Y_1, Y_2, Y_3)$.

Если параметры обслуживаемых объектов O_N и существующей инфраструктуры Q_I являются заданными и неизменными, а возможные условия D_J выполнения работ (определяемые совокупностью воздействующих факторов внешней среды) известны с некоторыми вероятностями, то частные технико-экономические показатели эффективности могут быть представлены как некоторые функции от варьируемых структурных параметров исследуемой системы и параметров организации поверочных работ, т.е. в общем случае имеет место отображение

$$f : Z, X \rightarrow Y \Leftrightarrow \forall z \in Z \wedge x \in X \exists y \in Y : y = f(z, x) \text{ при известных } O_N, Q_I, D_J, \quad (5)$$

где Y – обобщенное обозначение определяемого показателя.

Представленное формализованное описание может быть положено в основу постановки и решения широкого круга различных задач: от оценки отдельных показателей качества построения и функционирования поверочных органов, включая выбор вариантов параметров организации поверки и заканчивая задачами риск-ориентированного структурно-функционального синтеза системы в целом по совокупности технико-экономических показателей.

Решение подобных задач характеризуется необходимостью учета множества параметров и вариантов их сочетаний, и как следствие – исключительно высокой размерностью, невозможностью адекватного описания рассматриваемых процессов в рамках одной модели. Вследствие этого представляется целесообразным использование многомодельного подхода, подразумевающего многоаспектное моделирование различных сторон построения и функционирования исследуемой системы с учетом различных факторов, а также согласование и объединение частных моделей в единый комплекс.

Структура комплекса моделей

В состав комплекса моделей предусматривается включить частные модели, отражающие отдельные значимые аспекты построения и функционирования системы и позволяющие установить отношения между параметрами исследуемой системы и значениями выбранных показателей качества. При этом модель объекта – источника заявок на обслуживание и модель внешней среды в контексте данной задачи выступают как внешние формирующие исходные данные для решаемой задачи.

Структура комплекса моделей представлена на рис. 1.

Рассмотрим далее назначение, подходы к построению и порядок взаимодействия частных моделей при решении различных задач.

Модель распределения работ предназначена для описания распределения поверочных работ в установившемся стационарном режиме функционирования обслуживаемых объектов и поверочных органов, оценки качества такого распределения по значимым показателям, выбора вариантов распределения поверочных работ на основе такой оценки.

Ведомственная метрологическая служба является обеспечивающей и функционирует в интересах вышестоящей системы. Поэтому вполне естественным представляется создавать (или адаптировать) ее под потребности объектов обслуживания. Это означает, что распределение сил и средств поверки, области аккредитации поверочных органов целесообразно устанавливать в интересах рациональной организации обслуживания на всей обслуживаемой территории, а в случае необходимости – производить их перераспределение. Поэтому определяемыми параметрами в данной модели могут быть как параметры состава поверочных органов, так и, собственно, распределение объемов работ между поверочными органами.

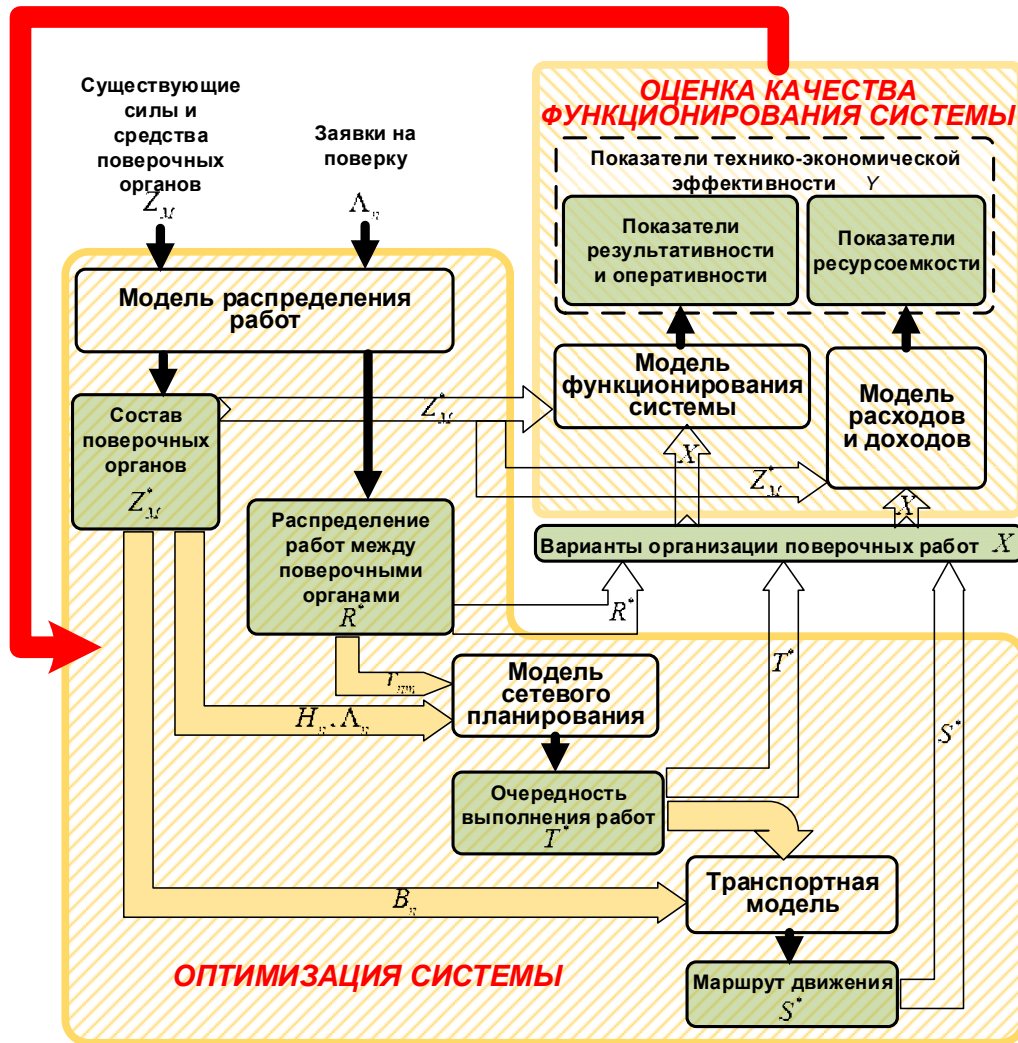


Рис. 1. Структура комплекса моделей

Структурные параметры системы поверочных органов могут быть определены в зависимости от нагрузочных характеристик потока заявок обслуживаемой системы и параметров существующей инфраструктуры, что в формализованном виде описывается отображением

$$f_1 : O_N, Q_I \rightarrow Z_M. \quad (6)$$

При известном составе поверочных органов может быть произведено распределение работ по поверке СИ от всех объектов по поверочным органам:

$$f_2 : O_N, Q_I, Z_M \rightarrow R. \quad (7)$$

Оценивание качества такого распределения поверочных работ целесообразно производить с позиций обеспечения оперативности. Требование оперативности подразумевает обеспечение своевременности поверочных работ и минимальной продолжительности нахождения СИ в поверочных органах (с учетом времени доставки и ожидания обслуживания). Кроме того, от показателей оперативности во многом зависят и экономические показатели поверочных работ. Поэтому модель должна позволять оценивать показатели оперативности работ в зависимости от значений структурных параметров системы поверочных органов и вариантов закрепления объектов – источников заявок между поверочными органами:

$$Y_T = Y_T(Z_M, R), \text{ при заданных } O_N, Q_I, \quad (8)$$

где Y_T – определяемый временной показатель.

Задача определения структурных параметров системы поверочных органов может решаться на основе моделей систем и сетей массового обслуживания с различными классами заявок [2, 3].

Задача рационального распределения поверочных работ в территориально распределенной системе, включающей N объектов – источников заявок на обслуживание и M поверочных органов, может быть интерпретирована в рамках известных задач линейного программирования, таких как обобщенная задача о назначениях, или как вариант многопродуктовой транспортной задачи с различными типами работ и исполнителей [4].

Результатом решения подобной задачи является схема закрепления, описывающая выбранный вариант закрепления объектов – источников заявок на поверку СИ между поверочными органами применительно к установившемуся режиму функционирования системы. В формализованном виде некоторый вариант закрепления R^* может быть описан матрицей:

$$R^* = r_{nm}, n = \overline{1, N}; m = \overline{1, M}. \quad (9)$$

Компоненты матрицы r_{nm} могут представлять собой числа, характеризующие количество обслуживаемых в m -м поверочном органе заявок от n -го объекта, либо вероятности поступления в m -й поверочный орган заявок на обслуживание от n -го объекта. В частном случае, когда от одного объекта обслуживания все заявки предусматривается направлять только в один поверочный орган, компоненты данной матрицы принимают значения только 0 или 1.

При известном варианте закрепления могут быть определены также величины нагрузки и коэффициенты загрузки каждого поверочного органа.

При выбранном составе поверочных органов и сформированных схемах закрепления могут решаться задачи планирования, включающие формирование календарных планов выполнения поверочных работ (календарное планирование), и планирование доставок СИ в поверочные органы и обратно или планирование передвижения подвижных поверочных лабораторий (планирование маршрутов). Для решения таких задач предназначены следующие модели – модель сетевого планирования и транспортная модель.

Модель сетевого планирования предназначена для описания распределения работ во времени, т.е. очередности и продолжительности выполнения работ по обслуживанию заявок каждого вида в каждом поверочном органе. Модель должна обеспечивать возможность рационального планирования работ во времени при известных параметрах потока заявок, выбранных структурных параметрах поверочных органов, выполненном закреплении объектов за поверочными органами с учетом существующей инфраструктуры. Иначе говоря, модель сетевого планирования предназначена для формирования допустимых вариантов календарных планов представления партий СИ на поверку:

$$f_3 : O_N, Q_I, Z_M, R \rightarrow T. \quad (10)$$

При формировании календарных планов должны использоваться в первую очередь временные показатели, характеризующие, с одной стороны – очередность представления и выполнения работ по поверке, общую продолжительность нахождения СИ в поверочных органах, с другой стороны – загрузку рабочих мест по поверке.

Результат применения модели – сетевой план выполнения работ T^* , который в формализованном виде может быть представлен следующим образом:

$$T^* = (\tau_{1,1}^\circ, \tau_{1,2}^\circ, \dots, \tau_{n,m}^\circ), n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}, \quad (11)$$

где $\tau_{n,m}^\circ$ – момент начала обслуживания заявки из n -го объекта обслуживания в m -м поверочном органе.

Отличительной особенностью данной модели является возможность координации (распределения) заявок по времени с учетом ограничений ресурсов поверочных органов и учетом предпочтительных моментов удовлетворения заявок для объектов обслуживания.

Данная задача является разновидностью задач сетевого планирования, подходы к решению подобных задач описаны, например, в работах [5, 6].

На основе применения данной модели формируются календарные планы работ поверочных органов и календарные план-графики представления на поверку СИ от всех объектов.

Транспортная модель предназначена для описания и планирования способов и маршрутов доставки партий СИ в поверочные подразделения либо маршрутов движения подвижных поверочных лабораторий. Данная модель должна обеспечивать возможность оптимального или рационального транспортного планирования при известных параметрах потока заявок и составе поверочных органов, выполненном закреплении объектов за поверочными органами, с учетом спланированных сроков завершения работ и существующей транспортной инфраструктуры. Для случаев обслуживания заявок в стационарных поверочных органах транспортная модель обеспечивает формирование допустимых способов и маршрутов доставки партий СИ в поверочные органы и обратно; а при обслуживании на местах расположения СИ – формирование рациональных маршрутов перемещений подвижных поверочных лабораторий между обслуживаемыми объектами:

$$f_4 : O_N, Q_I, Z_M, R, T \rightarrow S. \quad (12)$$

В качестве основных показателей качества в данной модели целесообразно использовать суммарную продолжительность и стоимость транспортирования (с учетом доступных видов транспорта), а также суммарные расстояния, среднюю и максимальную продолжительность отсутствия СИ на объектах по причине проведения проверок с учетом времени транспортирования и ожидания обслуживания.

Результатом решения задачи транспортного планирования являются маршруты движения транспортных средств при доставке СИ или маршруты движения подвижных поверочных лабораторий, обеспечивающие соответствие план-графикам представления СИ на проверку.

В формализованном виде некоторый вариант маршрутов доставки партий СИ S^* может быть описан в виде

$$S^* = (s_{1,1}^1, s_{1,2}^1, \dots, s_{n(m),m}^n), n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}, \quad (13)$$

где $s_{n(m),m}^n$ – маршрут движения средств измерений из n -ого объекта обслуживания в m -й поверочный орган (из одного поверочного органа в другой поверочный орган).

Отличительной особенностью данной модели является возможность формирования маршрута движения таким образом, что при прибытии в каждый поверочный орган его рабочие места не будут задействованы для выполнения других работ. При этом продолжительность между окончанием обслуживания в предыдущем и началом обслуживания в следующем поверочном органе равна продолжительности транспортировки между этими поверочными органами.

Подобные задачи могут решаться на основе методов линейного программирования, при этом задача определения маршрутов доставки СИ в стационарные поверочные органы может решаться как разновидность многопродуктовой транспортной задачи, а в случае использования подвижных поверочных лабораторий – как задача о коммивояжере. Подходы к решению подобных задач описаны, например, в работах [7, 8].

Следующую группу составляют модели, на основе которых возможно оценить качество функционирования системы в целом (включая и обслуживаемые объекты, и поверочные органы) по совокупности технико-экономических показателей. К этой группе относятся модель функционирования системы и модель расходов и доходов. В качестве входных данных для данных моделей используются полученные на основе уже рассмотренных моделей допустимые варианты решения частых задач распределения работ, планирования сроков и маршрутов доставки.

Модель функционирования системы предназначена для описания процессов выполнения поверочных работ в территориально распределенной ведомственной системе поверочных органов при различных вариантах построения системы, распределения и организации работ, а также для оценивания технических показателей качества функционирования системы. Основное назначение модели – определение для продолжительного во времени установившегося режима зависимостей показателей результативности и временных показателей процессов функционирования от структурных и функциональных параметров поверочных органов при заданных параметрах обслуживаемых объектов, существующей инфраструктуры и возможных условиях выполнения работ:

$$Y_r = Y_r(Z, X), \quad Y_t = Y_t(Z, X), \quad \text{при заданных } O_N, Q_I, D_J,$$

$$Y_r \in Y_R, \quad Y_t \in Y_T, \quad (14)$$

где Y_R и Y_T – множества определяемых показателей результативности и оперативности соответственно.

В качестве показателей результативности поверочной деятельности могут использоваться:

– вероятность достижения цели $P_{\text{ДЦ}}(T_{\text{пл}})$ – вероятность того, что за установленный интервал времени $T_{\text{пл}}$ объем качественно выполненных поверочных работ окажется не меньше запланированного;

– отношение количества качественно выполненных за плановый период проверок СИ к числу запланированных проверок $N_p(T_{\text{пл}})/N_o(T_{\text{пл}})$ и др.

В составе показателей оперативности целесообразно использовать:

– вероятность выполнения запланированного объема работ за заданное время, т.е. вероятность того, что фактическое время $\tau_{\text{ф}}$ выполнения требуемого объема N_0 работ по поверке не превысит планового $T_{\text{пл}}$: $P_{N_0}(\tau_{\text{ф}} \leq T_{\text{пл}})$;

– средние продолжительности составляющих процесса поверки: времени доставки $\tau_{\text{тр}}$, времени ожидания в очереди $\tau_{\text{ож}}$, собственно времени поверки $\tau_{\text{п}}$, времени обслуживания в целом $\tau_{\text{обсл}} = \tau_{\text{тр}} + \tau_{\text{ож}} + \tau_{\text{п}}$;

– средняя доля времени, в течение которого СИ отсутствуют на месте штатной эксплуатации по причине проведения поверки и др.

При этом показатели результативности и оперативности процессов поверки СИ являются взаимозависимыми через общие каналы обслуживания.

В основе такой модели функционирования поверочных органов может быть использован математический аппарат локально сбалансированных замкнутых неоднородных сетей массового обслуживания [2, 3, 10]. Это позволит определить нагрузочно-временные характеристики функционирования системы, а через них – показатели результативности и оперативности, причем с учетом как структурных параметров системы, так и параметров организации поверочных работ.

Модель расходов и доходов предназначена для описания процессов расходования ресурсов при различных вариантах построения поверочных органов и организации работ, определения величин расходуемых ресурсов и получаемых доходов, а также оценивания экономической эффективности поверочной деятельности. В модели могут рассматриваться различные виды ресурсов: природные (газ, вода, воздух и др.), материальные (оборудование, электроэнергия, топливо и пр.), информационные (обучение, документация и пр.), трудовые (персонал), финансовые. Ресурсы различных видов выражаются в принятых для них натуральных единицах. Кроме того, все ресурсы посредством пересчета могут быть сведены к стоимостным. Поэтому в качестве показателей ресурсоемкости можно использовать как собственно объемы расходуемых ресурсов, так и их стоимости.

В составе стоимостных показателей принято выделять две группы затрат: единовременные и текущие. Единовременные (капитальные) затраты могут включать затраты на строительство (оборудование) помещений поверочных подразделений, оснащение рабочих мест по поверке СИ, первоначальное обучение персонала, приобретение (разработку) нормативно-технической документации, создание резервного парка СИ, приобретение транспортных средств. Эти затраты определяются главным образом параметрами системы поверочных органов – видами областей аккредитации на поверку и необходимым количеством соответствующих им типов рабочих мест по поверке СИ:

$$Y_K = Y_K(G_M), \quad \text{при заданных } O_N, Q_I, D_J. \quad (15)$$

Текущие затраты обусловлены расходованием ресурсов в процессе функционирования системы. Составляющие текущих затрат многочисленны и разнообразны. Величины составляющих текущих затрат зависят как от структурных параметров системы, так и от параметров

организации работ. Общие текущие затраты определяют, как правило, как сумму составляющих за календарный интервал времени, обычно равный одному году:

$$Y_C(t) = Y_C(O_N, Q_I, Z_M, R, T, S) = \sum_{k=1}^K C_k(t), \quad (16)$$

где $C_k(t)$, $k = \overline{1, K}$ – составляющие по видам текущих затрат (например, транспортные расходы, затраты на эксплуатацию средств поверки, оплата электроэнергии, расходных материалов, амортизационные отчисления, заработная плата с отчислениями и пр.) за год.

Суммарные затраты на поверочную деятельность в ведомственной метрологической службе можно оценить через величину приведенных затрат, определяемых с учетом текущих и капитальных составляющих.

В случае, если предусматривается коммерческая деятельность, необходим также учет доходов. Расчет составляющих доходов также производится за год функционирования.

Для корректного учета результатов экономической деятельности на продолжительном интервале функционирования целесообразно использовать модели дисконтированных денежных потоков [9, 10]. На основе такой модели могут быть определены как собственно затраты и доходы, так и значения показателей экономической эффективности: экономический эффект, чистый доход, срок окупаемости и др.

С использованием модели функционирования системы и модели расходов и доходов может производиться оценивание по совокупности показателей как отдельных аспектов функционирования поверочных органов, так и технико-экономической эффективности системы в целом.

Заключение

Рассмотренный комплекс моделей позволяет с единых позиций выполнить формализованное описание состава и функционирования территориально распределенной ведомственной системы поверочных органов, определить множества основных параметров системы и показателей качества, а также отношения между этими множествами.

С использованием комплекса моделей возможно формирование и оценивание вариантов построения поверочных подразделений и организации поверочных работ. Для выбора наиболее предпочтительных в некотором смысле или рациональных вариантов необходимо совместное использование частных моделей в единой итерационной процедуре формирования, оценивания и сравнения вариантов.

Список литературы

1. Калинин В. Н., Резников Б. А., Варакин Е. И. Теория систем и оптимального управления. Л. : Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского, 1979. С. 112.
2. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М. : Машиностроение, 1979. 432 с.
3. Ефремов А. С., Швед А. С., Лукичев Л. В. Структурно-функциональная модель распределенной системы поверочных органов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 22–30.
4. Юдин Д. Б., Гольштейн Е. Г. Задачи и методы линейного программирования. М. : Советское радио, 1969. 736 с.
5. Буснюк Н. Н. Разновидности задачи сетевого планирования, некоторые методы их решения и алгоритмические оценки // Алгоритмизация и программирование. 2017. № 3. С. 101–104.
6. Буснюк Н. Н., Новиков В. А. Метод решения задачи сетевого планирования при ограниченных трудовых ресурсах // Труды БГТУ. Физико-математические науки и информатика. 2017. № 2. С. 126–128.
7. Шикин Е. В., Чхартишвили А. Г. Математические методы и модели в управлении. М. : Дело, 2004. 440 с.
8. Khoufi I., Laouiti A., Adjih C. A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles // Drones. 2019. Vol. 3, № 3. P. 30.
9. Ефремов А. С., Иванов А. В., Лукичев Л. В. Определение показателей качества организации поверочных работ в децентрализованной распределенной системе поверочных органов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 30–38.
10. Ефремов А. С., Васюкович Д. С., Пузанков С. В. Оценка технико-экономической эффективности функционирования системы поверочных органов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 47–55.

References

1. Kalinin V.N., Reznikov B.A., Varakin E.I. *Teoriya sistem i optimal'nogo upravleniya = Theory of systems and optimal control*. Leningrad: Voennoy inzhenernyy krasnoznamennyy institut im. A.F. Mozhayskogo, 1979:112. (In Russ.)
2. Kleynrok L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya = Theory of mass service*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979:432. (In Russ.)
3. Efremov A.S., Shved A.S., Lukichev L.V. Structural and functional model of a distributed system of verification organs. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(2):22–30. (In Russ.)
4. Yudin D.B., Gol'shteyn E.G. *Zadachi i metody lineynogo programmirovaniya = Tasks and methods of linear programming*. Moscow: Sovetskoye radio, 1969:736. (In Russ.)
5. Busnyuk N.N. Varieties of network planning tasks, some methods of their solution and algorithmic estimates. *Algoritmizatsiya i programmirovaniye = Algorithmization and programming*. 2017;(3):101–104. (In Russ.)
6. Busnyuk N.N., Novikov V.A. A method for solving the problem of network planning with limited labor resources. *Trudy BGUTU. Fiziko-matematicheskie nauki i informatika = Proceedings of BSTU. Physical and mathematical sciences and computer science*. 2017;(2):126–128. (In Russ.)
7. Shikin E.V., Chkhartishvili A.G. *Matematicheskie metody i modeli v upravlenii = Mathematical methods and models in management*. Moscow: Delo, 2004:440. (In Russ.)
8. Khoufi I., Laouiti A., Adjih C. A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles. *Drones*. 2019;3(3):30.
9. Efremov A.S., Ivanov A.V., Lukichev L.V. Determination of quality indicators for the organization of verification work in a decentralized distributed system of verification bodies. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(2):30–38. (In Russ.)
10. Efremov A.S., Vasyukovich D.S., Puzankov S.V. Assessment of the technical and economic efficiency of the functioning of the verification system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):47–55. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Станиславович Ефремов

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

Andrey S. Efremov

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

Леонид Викторович Лукичев

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

Leonid V. Lukichev

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 28.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.07.2024

Принята к публикации / Accepted 12.08.2024

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

УДК 004.89, 004.413.5, 519.724
doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-16

СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА БИОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ ГЕНОМНОЙ ПРИРОДЫ И НОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

М. В. Спринджук¹, В. И. Берник², А. П. Кончиц³

¹Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

²Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

³Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
¹stepanenkomatvei@yandex.ru, ²bernik@im.bas-net.by, ³konchits@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена колоссальным ростом объемов накопленной и недообработанной информации медицинского назначения, эволюцией математического и алгоритмического аппарата, необходимостью усовершенствования существующих конвейеров обработки данных. Целью работы было сообщение и рассмотрение предложенной авторами новой классификации и концепций интерпретации данных, а также опыта разработки программного обеспечения. *Материалы и методы.* Рассматриваются вопросы классификации программного обеспечения для автоматизации процесса анализа биоинформационных данных геномной природы и новые принципы интерпретации вычислительных экспериментов в геномике. *Результаты и выводы.* Как результат в статье представлен краткий обзор литературы по теме современной вычислительной геномики, биоинформатики, математической биологии, медицинской кибернетики, больших данных для медицины и биологии. секвенированию нуклеиновых кислот, опыт разработки конвейеров для анализа геномных данных, новая классификация программного обеспечения и концепции интерпретации данных в этой сложной междисциплинарной многокомпонентной предметной области.

Ключевые слова: медицинская кибернетика, системы медицинского назначения, геномика, представление и отображение информации, интерпретация данных, большие данные, биоинформатика, прикладная математика, искусственный интеллект, машинное обучение, судебная экспертиза ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты)

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта ISTC PR150 "Belarus TB Database and TB Poland".

Для цитирования: Спринджук М. В., Берник В. И., Кончиц А. П. Современная классификация программного обеспечения для анализа биоинформационных данных геномной природы и новые концепции интерпретации вычислительных экспериментов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 139–148. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-16

MODERN CLASSIFICATION OF SOFTWARE FOR THE ANALYSIS OF BIOINFORMATION DATA OF GENOMIC NATURE AND NOVEL CONCEPTS FOR THE INTERPRETATION OF COMPUTATIONAL EXPERIMENTS

M.V. Sprindzuk¹, V.I. Bernik², A.P. Konchits³

¹United Institute of Informatics Problems of the Belarus National Academy of Sciences, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Forest Institute of the National Academy of sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

¹stepanenkomatvei@yandex.ru, ²bernik@im.bas-net.by, ³konchits@yandex.ru

Abstract. *Background.* The emergence and importance of the research topic is substantiated by the colossal growth in the volume of accumulated and underprocessed medical information, the evolution of mathematical and algorithmic apparatus, and the need to improve existing data processing pipelines. The purpose of the work was to review and report the new classification and concepts of data interpretation proposed by the authors, as well as an experience in software development. *Materials and methods.* The questions of classification of software for automating the process of analyzing bioinformational data of the genomic nature and new the principles for interpreting computational experiments in genomics are discussed. *Results and conclusions.* As a result, the article presents a brief review of the literature on the topic of modern computational genomics, bioinformatics, mathematical biology, medical cybernetics, big data for medicine and biology, nucleic acid sequencing technologies, experience in developing pipelines for the analysis of genomic data, the new classification of software and concepts for interpreting data in this complex interdisciplinary multi-component subject area.

Keywords: medical cybernetics, medical systems, genomics, presentation and display of information, data interpretation, big data, bioinformatics, applied mathematics, artificial intelligence, machine learning, forensic DNA

Financing: the study was supported by the ISTC PR150 grant "Belarus TB Database and TB Poland".

For citation: Sprindzuk M.V., Bernik V.I., Konchits A.P. Modern classification of software for the analysis of bioinformation data of genomic nature and novel concepts for the interpretation of computational experiments. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2024;(4):139–148. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-16

Введение

Биоинформатика как междисциплинарная ветвь генетики и кибернетики претерпела долгий путь эволюционного развития от недоверия и обвинений в отсутствии истины до современных успехов в изучении генома человека, микробов и растений (рис. 1).



Рис. 1. Основные сферы применения технологий секвенирования следующего поколения (CCP; NGS – next generation sequencing), ключевых технических средств современной генетики и биоинформатики

Наиболее яркими примерами успешного применения геномики и биоинформатики являются получение доказательств и последующее раскрытие преступлений против жизни и здоровья на основе вычислительного анализа ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты), идентификации по биологическим следам непосредственно со сцены преступления, как правило, убийства

и прочего насилия [1]. Актуальность геномических исследований также связана с ростом опасных вирусных инфекций, наследственной патологии, онкологии (рис. 2, 3).



Рис. 2. Сферы применения технологий анализа больших биоинформационных данных геномной природы для персонализированной медицины и фармакологии [2]



Рис. 3. Слайд-диаграмма применения технологий искусственного интеллекта для разработки и оценки эффективности новых вакцин и лекарственных средств [3]

Секвенирование (рис. 1) – это процесс определения порядка положения нуклеотидов в молекуле ДНК. Открытия, совершенные в 70-х гг. прошлого века Сэнгером и Максамом – Гилбертом, позволили осуществить технологический прорыв, сделав секвенирование рабочим инструментом для большого количества исследователей в биологии, медицине, криминалистике, лесном и сельском хозяйствах, пищевой промышленности и т.д. За последние 60 лет секвенирование ДНК значительно продвинулось с точки зрения приборостроения, программных инструментов и методик анализа информации. Секвенирование ДНК – экспериментальный метод определения последовательного расположения оснований нуклеиновых кислот (А, Т, Г и С) в полинуклеотиде, кодирующем различные белки, которые функционируют в клетке. Полный набор кодирующих и некодирующих последовательностей в ДНК живого организма называется геномом. Геном имеет информацию обо всех белках, необходимых для существования и функционирования жизни организма. Биологические последовательности (секвенции нуклеотидов, аминокислот, белков) показывают некоторое сходство между собой. Это можно определить путем поиска гомологичности между последовательностями.

Технологии метода химической дегградации, предложенные Максамом и Гилбертом, метод дидезокси-терминации цепи, разработанный командой Sanger в 1977 г., и автоматическое секвенирование с помеченной флуоресценцией в 1990-х гг. вместе сформировали первое поколение секвенирования (FGS – first generation sequencing). Благодаря своей сравнительной простоте метод Сэнгера стал доминирующим методом в FGS. Секвенирование Сэнгера позволило секвенировать бактериофаг PhiX 174, который содержит приблизительно 5375 нуклеотидов. Это исследование стало первым полностью секвенированным геномом в 1977 г. В 2003 г. международный проект консорциума «Геном человека» (HGP – human genome project) успешно секвенировал и картировал весь геном человека, что произошло после 13 лет исследований во многих лабораториях мира. Секвенирование второго поколения (SGS, second generation sequencing) или секвенирование следующего поколения (NGS – next generation sequencing) относится к высокопроизводительным технологиям секвенирования ДНК и РНК (рибонуклеиновой кислоты), которые могут секвенировать даже миллиарды нитей нуклеиновых кислот. Процесс идентификации последовательности происходит с использованием репликации или амплификации, обеспечивающей значительную пропускную способность и многократное секвенирование целевых участков. Секвенирование третьего поколения (TGS – third generation sequencing) характеризуется обработкой нуклеотидов по одному для получения длинных и точных результатов секвенирования, в то время как технология амплификации не используется. Одноклеточное секвенирование также относится к технологии TGS [4]. Секвенирование ДНК и РНК на сегодняшний день выполняется всего несколькими технологиями, описание которых приводится далее в тексте статьи.

Принцип, преимущества и недостатки технологии Illumina/Solexa

Технология секвенирования с помощью синтеза (SBS – synthesis based sequencing) Illumina/Solexa основана на методе реверсивной терминации (reversible termination). Секвенирование Illumina путем синтеза состоит из четырех основных этапов: подготовка образца, генерация кластеров, секвенирование и анализ данных [4]. Одним из главных преимуществ технологии SBS является то, что со стандартными реагентами она позволяет секвенировать до 100 образцов за цикл работы. Также SBS-технология имеет явное преимущество при секвенировании гомополимерных последовательностей по сравнению с 454 или Ion Torrent, поскольку позволяет включать один нуклеотид на реакцию. Значительным преимуществом данной платформы является возможность парноконцевого чтения последовательностей ДНК. Одним из основных недостатков технологии SBS остается ограничение длины прочтений, особенно когда речь идет о задачах расшифровки последовательности de novo. Ошибки замещения появляются из-за увеличения фонового шума в каждом цикле, гомополимеров, смещение GC-ratio (соотношения гуанина и цитозина) в ходе мостиковой амплификации. Эта технология секвенирования на основе синтеза ДНК нитей. Отличается высокой пропускной способностью с высокой точностью и воспроизводимостью [5].

Технология Ion Torrent

Платформа Ion Torrent – это первая технология, которая не применяет оптические датчики. В этом методе используется полупроводниковая система обнаружения при секвенировании последовательности, основанная на обнаружении ионов водорода, которые являются

побочными продуктами добавления нуклеотидов к шаблонной цепи во время полимеризации. Бусины, содержащие обогащенную ДНК, добавляются в микроячейку на чипе. Основным преимуществом Ion Torrent секвенирования является то, что оно использует относительно простую химию в процессе секвенирования и требует сравнительно очень небольшого размера образца для анализа. Отсюда – высокая скорость секвенирования при низких эксплуатационных расходах. В качестве недостатков следует отметить наличие значительного количества ошибок секвенирования в виде однонуклеотидных вставок и делеций. Для решения этой проблемы Life Technologies выпустила обновление программного продукта Ion Reporter. Вторым недостатком этой системы является короткая длина читаемого фрагмента по сравнению с другими методами секвенирования, такими как секвенирование по Сэнгеру или пиросеквенирование. Большие длины читаемых фрагментов полезны особенно для сборки генома *de novo* [26], что обеспечивает быстрое, достаточно точное и удобное в использовании секвенирование. Качество секвенирования может быть ухудшено наличием гомополимеров и повторов [5].

Мобильное оборудование секвенирования Oxford Nanopore

Принцип работы секвенаторов ONT (Oxford nanopore technology) основан на измерении электрического тока при прохождении молекулы нуклеиновой кислоты через нанопору. Обнаружение осуществляется в камере с разделенной мембраной, содержащей нанопору. К камере прикладывается электрическое напряжение, заставляющее ДНК или РНК двигаться через пору. По мере прохождения молекулы сечение поры уменьшается, в результате чего уменьшается сила тока. Таким образом, измеряя ток, можно определить тип нуклеотида, проходящего через пору в заданный интервал времени. По сравнению с существующими методами секвенирования использование данного метода секвенирования имеет такие преимущества, как низкая стоимость и доступность использования, высокая чувствительность, высокая длина считывания (до десятков тысяч оснований), высокая портативность, быстрый анализ и отображение результатов в реальном времени. К недостаткам можно отнести такие свойства, как низкое качество считываний по сравнению с другими платформами [4]. Частота ошибок секвенирования может быть высокой, особенно при повторах прочтений и наличии высокомолекулярных регионов. Кроме того, качество секвенирования может быть затронуто наличием примесей [5].

PacBio (Pacific Bioscience)

Высококачественная технология секвенирования, которая может генерировать длинную цепочку ДНК последовательности с высоким качеством, позволяет обеспечить распознавание сложных геномных регионов и точное выявление генетических вариантов. Способна осуществлять обнаружение эпигенетических модификаций. Самое дорогое по цене секвенирование требует большого количества данных для генерации надежных результатов [5].

Классификация программного обеспечения для анализа биоинформационных данных геномной природы

Компьютерная программа представляет собой набор команд электронной машине и набор обрабатываемых данных. На сегодняшний день в медицинской кибернетике и биоинформатике доминируют скриптовые языки программирования Python, R, Shell. Тем не менее крупные программно-вычислительные комплексы создаются на основе ресурсов языков программирования Java, C++, C#, часто используют несколько языков программирования и имеют привязку к ресурсам интернета.

Современное программное обеспечение, предназначенное для анализа биоинформационных данных геномной природы (рис. 4) [6–8], можно классифицировать, обобщая свои знания и опыт изучения, разработки и применения автоматизированных систем анализа данных, следующим образом:

1. Программное обеспечение, исполняемое внутри специальной облачной платформы Galaxy, KNIME (Konstanz information miner), наиболее эффективно для быстрой разработки конвейеров анализа данных при условии владения разработчиком соответствующей технологии.
2. Настольное программное обеспечение имеет графический интерфейс пользователя к выполнению команд для манипуляции данными. Оно может иметь привязку к Интернету (вариант А) или быть независимым в своих функциях от Интернета (вариант Б).

3. Полностью веб-приложение, работающее на высокопроизводительном сервере хостинга, имеющее соответствующий веб-интерфейс из HTML (язык гипертекстовой разметки, *hypertext markup language*) форм, позволяющее загружать данные и выводить результаты обработки информации с функциями загрузки отчетов, пересылки, визуализации результатов в браузере.

4. Безындерфейсные скрипты. Они могут представлять собой многофункциональную самостоятельную компьютерную программу или быть элементом программно-вычислительного комплекса. Широко используются для учебных и практических задач.

5. Конвейерные технологии, имеющие специальный семантический язык программирования. Наиболее распространены для целей вычислительной геномики и транскриптомики SnakeMake [9] и NextFlow [10].



Рис. 4. Программное обеспечение для анализа биоинформационных данных геномной природы

Дополнительно можно номенклатурно классифицировать программное обеспечение для анализа биоинформационных данных геномной природы по следующим критериям-признакам:

- применение технологий контейнеризации (да/нет);
- применение и реализации технологий искусственного интеллекта (да/нет);
- по количеству используемых в программной реализации языков программирования;
- по наличию коммуникации с мобильными устройствами связи и передачи и информации (да/нет);
- по кроссплатформенности (да/нет);
- по возможности обрабатывать так называемые большие и грязные данные (да/нет).

На рис. 5 представлен пример современного программного обеспечения: разработанный авторами конвейер обработки геномных текстов микобактерии туберкулеза, предназначенный для обнаружения устойчивости к современным лекарственным антитуберкулезным медикаментам.

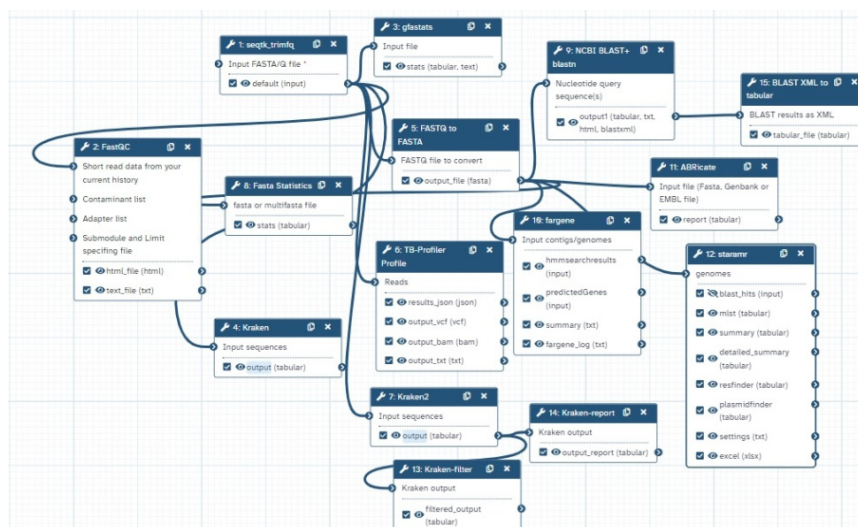


Рис. 5. Автоматический конвейер, предназначенный для быстрой оценки геномов *M. Tuberculosis* на предмет лекарственной устойчивости и вирулентности

Биоинформационная технология Galaxy – это свободно доступная платформа, предоставляющая сегодня возможность инженерам-программистам, биоинформатикам выбирать и включать лучшее доступное программное обеспечение для геномики в собственные конвейеры и в конечном итоге интегрировать конвейеры в автоматизированные облачные системы обработки данных. В таких конвейерах обработки геномной информации можно использовать современные инструменты вычислительной микробиологии, предназначенные для анализа данных секвенирования следующего поколения (коротких и длинных прочтений, их гибридов), включая TbProfiler [11, 12] Snippy [<https://github.com/tseemann/snippy>], Staramr [13], ResFinder [14–18], VirulenceFinder [19, 26], Flye [20], Medaka [<https://github.com/nanoporetech/medaka>], Kraken [7, 12], BLAST (basic local alignment search tool, базовый инструмент поиска сходства последовательностей, основанный на локальном выравнивании) [23], Prokka [26] и многие другие.

Концепции интерпретации данных

Биоинформационные вычислительные эксперименты генерируют множество разнородной по составу и большой по объему информации. Поэтому имеется интерес и необходимость изучения теоретических основ интерпретации таких данных. На основе многолетнего личного опыта и данных литературы [24, 25] авторы сформулировали концепции интерпретации биоинформационных данных геномной природы (рис. 6).



Рис. 6. Концепции интерпретации биоинформационных данных геномной природы

1. Концепция генерации или присвоения терминов на основе сравнения и сопоставления с базами данных. На этом принципе построены системы номенклатуры NextClade SARS-CoV-2 (Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus-2; Коронавирус-2, связанный с тяжелым острым респираторным синдромом) и программное обеспечение для аннотирования геномных или транскриптомных текстов. Новые термины могут генерироваться по заданным правилам накопления мутаций как отличий от референсного генома или их множества.

2. Концепция выделения доминирующих сигналов из множества генерируемых по заданным правилам фильтрации, объединения, элиминации, трансформации. На таком принципе, например, построено программное обеспечение генерации отчетов о мутационном профиле в результате выравнивания и запроса вариантов.

3. Концепция презумции ошибочности и несоответствия. Под этим подразумевается необходимость понимания и критического анализа каскада генерации данных и вероятность наличия в данных ошибок различной природы, в том числе по причине наличия ошибок в референсных базах данных и экспертных знаний, в случайной природе вычислительных экспериментов с нейронными сетями и другими алгоритмами машинного обучения. История генетики и биоинформатики полна фактов первоначального недоверия и известных экспертных ошибок, особенно в криминалистике ДНК-идентификации, но с развитием технологий появилось множество доказательных фактов об успешности применения биоинформационного анализа данных геномной природы.

4. Концепция отображения результата в виде графической информации в двумерной или трехмерной плоскостях. Примером может послужить точечный график сравнения двух геномных текстов.

5. Концепция управляемости результатами анализа данных. В настоящее время выбор алгоритмов и программного обеспечения для анализа геномных данных огромен, он уменьшается при конкретизации целей и задач исследования, но остается еще и следующая ступень выбора комбинации настроек программного обеспечения.

6. Концепция недостатка и несбалансированности наборов данных, ее неполноты и избыточности, грязных данных. Имеет общее с концепцией № 3, но в первую очередь подразумеваются дефекты не баз данных, а входной информации. Исследователю необходимо осознавать дефекты информации, подлежащей критическому анализу.

7. Концепция эволюции, нестабильности и изменчивости информации.

8. Концепция математического представления данных. С появлением нового математического аппарата расширяются реальные возможности представления и интерпретации.

Заключение

Технологии секвенирования ДНК и РНК развиваются вместе с достижениями биохимии, биофизики, кибернетики, математики и биологии и сегодня представляют современный арсенал технических средств для изучения основы живой природы для решения междисциплинарных задач. Снижение стоимости секвенирования и компьютеров приводит к широкому распространению и доступности данной технологии. В данной статье приводится классификация программного обеспечения для вычислительной биологии и геномики, а также обсуждаются сформулированные авторами концепции интерпретации результатов вычислительных экспериментов в данной предметной области. Надеемся, что предложенные концепции найдут свое применение и развитие не только в биоинформатике и медицинской кибернетике. Литературы по разработке и классификации программного обеспечения для науки не так много, правильная организация и упорядочивание такой информации будут полезны для современных программистов, занимающихся усовершенствованием информационных технологий. Аналитическое обобщение и номенклатура современных компьютерных технологий необходимы для возможности адекватного выбора реальных технических средств разработки информационных систем.

Список литературы

1. Primorac D., Schanfield M. Forensic DNA applications: An interdisciplinary perspective. CRC Press, 2023. 506 p.
2. Flynn J. T. Pediatric hypertension. N. Y. : Springer Berlin Heidelberg, 2018. 1005 p.
3. Singh T. R., Saini H., Junior M. C. Bioinformatics and Computational Biology: Technological Advancements, Applications and Opportunities. CRC Press, 2023. 350 p.
4. Бородинов А., Манойлов В., Заруцкий И. [и др.]. Поколения методов секвенирования ДНК (обзор) // Научное приборостроение. 2020. Vol. 30, № 4. P. 3–20.
5. Martinez-Carranza J., Inzunza-Gonzalez E., Garcia-Guerrero E. E., Tlelo-Cuautle E. Machine Learning for Complex and Unmanned Systems. Boca Raton : CRC Press, 2024. 382 p.
6. Leipzig J. A review of bioinformatic pipeline frameworks // Briefings in bioinformatics. 2017. Vol. 18, № 3. P. 530–536.
7. Wratten L., Wilm A., Göke J. Reproducible, scalable, and shareable analysis pipelines with bioinformatics workflow managers // Nature methods. 2021. Vol. 18, № 10. P. 1161–1168.
8. Yang A., Troup M., Ho J.W. Scalability and validation of big data bioinformatics software // Computational and structural biotechnology journal. 2017. Vol. 15. P. 379–386.
9. Köster J., Rahmann S. Snakemake—a scalable bioinformatics workflow engine // Bioinformatics. 2012. Vol. 28, № 19. P. 2520–2522.
10. Di Tommaso P., Chatzou M., Floden E. W. [et al.]. Nextflow enables reproducible computational workflows // Nature biotechnology. 2017. Vol. 35, № 4. P. 316–319.
11. Mahe P., El Azami M., Barlas P., Tournoud M. A large scale evaluation of TBProfiler and Mykrobe for antibiotic resistance prediction in Mycobacterium tuberculosis // Peer J. 2019. Vol. 7. P. e6857.
12. Verboven L., Phelan J., Heupink T. H., Van Rie A. Correction: TBProfiler for automated calling of the association with drug resistance of variants in Mycobacterium tuberculosis // PLoS One. 2023. Vol. 18, № 10. P. e0293254.

13. Bharat A., Petkau A., Avery B. P. [et al.]. Correlation between Phenotypic and In Silico Detection of Antimicrobial Resistance in Salmonella enterica in Canada Using Staramr // *Microorganisms*. 2022. Vol. 10, № 2. P. 292.
14. Bortolaia V., Kaas R. S., Ruppe E. [et al.]. ResFinder 4.0 for predictions of phenotypes from genotypes // *J Antimicrob Chemother*. 2020. Vol. 75, № 12. P. 3491–3500.
15. Florensa A. F., Kaas R. S., Clausen P. [et al.]. ResFinder – an open online resource for identification of antimicrobial resistance genes in next-generation sequencing data and prediction of phenotypes from genotypes // *Microb Genom*. 2022. Vol. 8, № 1. P. 000748.
16. Kleinheinz K. A., Joensen K. G., Larsen M. V. Applying the ResFinder and VirulenceFinder web-services for easy identification of acquired antibiotic resistance and *E. coli* virulence genes in bacteriophage and prophage nucleotide sequences // *Bacteriophage*. 2014. Vol. 4, № 1. P. e27943.
17. Verschuuren T., Bosch T., Mascaro V. [et al.]. External validation of WGS-based antimicrobial susceptibility prediction tools, KOVER-AMR and ResFinder 4.1, for Escherichia coli clinical isolates // *Clin Microbiol Infect*. 2022. Vol. 28, № 11. P. 1465–1470.
18. Zankari E. Comparison of the web tools ARG-ANNOT and ResFinder for detection of resistance genes in bacteria // *Antimicrob Agents Chemother*. 2014. Vol. 58, № 8. P. 4986.
19. Roer L., Kaya H., Tedim A. P. [et al.]. VirulenceFinder for Enterococcus faecium and Enterococcus lactis: an enhanced database for detection of putative virulence markers by using whole-genome sequencing data // *Microbiol Spectr*. 2024. № 1. P. e0372423.
20. Freire B., Ladra S., Parama J. R. Memory-Efficient Assembly Using Flye // *IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinform*. 2022. Vol. 19, № 6. P. 3564–3577.
21. Gomi R., Wyres K. L., Holt K. E. Detection of plasmid contigs in draft genome assemblies using customized Kraken databases // *Microb Genom*. 2021. Vol. 7, № 4. P. 000550.
22. Lu J., Rincon N., Wood D. E. [et al.]. Metagenome analysis using the Kraken software suite // *Nat Protoc*. 2022. Vol. 17, № 12. P. 2815–2839.
23. Piccoli C., Munoz-Merida A., Crottini A. PARSID: a Python script for automatic analysis of local BLAST results for a rapid molecular taxonomic identification // *BMC Res Notes*. 2024. Vol. 17, № 1. P. 35.
24. Meakin G. E., Kokshoorn B., van Oorschot R. A., Szkuta B. Evaluating forensic DNA evidence: Connecting the dots // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science*. 2021. Vol. 3, № 4. P. e1404.
25. Pope, S., Puch-Solis, R. Interpretation of DNA data within the context of UK forensic science investigation // *Emerging Topics in Life Sciences*. 2021. Vol. 5, № 3. P. 395–404.
26. Seemann T. Prokka: rapid prokaryotic genome annotation // *Bioinformatics*. 2014. Vol. 30, № 14. P. 2068–2069.

References

1. Primorac D., Schanfield M. *Forensic DNA applications: An interdisciplinary perspective*. CRC Press, 2023:506.
2. Flynn J.T. *Pediatric hypertension*. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2018:1005.
3. Singh T.R., Saini H., Junior M.C. *Bioinformatics and Computational Biology: Technological Advancements, Applications and Opportunities*. CRC Press, 2023:350.
4. Borodinov A., Manoylov V., Zarutskiy I. et al. Generations of DNA sequencing methods (review). *Nauchnoe priboroostroenie = Scientific instrumentation*. 2020;30(4):3–20.
5. Martinez-Carranza J., Inzunza-Gonzalez E., Garcia-Guerrero E.E., Tlelo-Cuautle E. *Machine Learning for Complex and Unmanned Systems*. Boca Raton: CRC Press, 2024:382.
6. Leipzig J. A review of bioinformatic pipeline frameworks. *Briefings in bioinformatics*. 2017;18(3): 530–536.
7. Wratten L., Wilm A., Göke J. Reproducible, scalable, and shareable analysis pipelines with bioinformatics workflow managers. *Nature methods*. 2021;18(10):1161–1168.
8. Yang A., Troup M., Ho J.W. Scalability and validation of big data bioinformatics software. *Computational and structural biotechnology journal*. 2017;15:379–386.
9. Köster J., Rahmann S. Snakemake—a scalable bioinformatics workflow engine. *Bioinformatics*. 2012;28(19):2520–2522.
10. Di Tommaso P., Chatzou M., Floden E.W. et al. Nextflow enables reproducible computational workflows. *Nature biotechnology*. 2017;35(4):316–319.
11. Mahe P., El Azami M., Barlas P., Tournoud M. A large scale evaluation of TBProfiler and Mykrobe for antibiotic resistance prediction in Mycobacterium tuberculosis. *Peer J*. 2019;7:e6857.
12. Verboven L., Phelan J., Heupink T.H., Van Rie A. Correction: TBProfiler for automated calling of the association with drug resistance of variants in Mycobacterium tuberculosis. *PLoS One*. 2023;18(10):e0293254.
13. Bharat A., Petkau A., Avery B.P. et al. Correlation between Phenotypic and In Silico Detection of Antimicrobial Resistance in Salmonella enterica in Canada Using Staramr. *Microorganisms*. 2022;10(2):292.
14. Bortolaia V., Kaas R. S., Ruppe E. et al. ResFinder 4.0 for predictions of phenotypes from genotypes. *J Antimicrob Chemother*. 2020;75(12):3491–3500.

15. Florensa A.F., Kaas R.S., Clausen P. et al. ResFinder – an open online resource for identification of antimicrobial resistance genes in next-generation sequencing data and prediction of phenotypes from genotypes. *Microb Genom.* 2022;8(1):000748.
16. Kleinheinz K.A., Joensen K.G., Larsen M.V. Applying the ResFinder and VirulenceFinder web-services for easy identification of acquired antibiotic resistance and *E. coli* virulence genes in bacteriophage and prophage nucleotide sequences. *Bacteriophage.* 2014;4(1):e27943.
17. Verschuuren T., Bosch T., Mascaro V. et al. External validation of WGS-based antimicrobial susceptibility prediction tools, KOVER-AMR and ResFinder 4.1, for *Escherichia coli* clinical isolates. *Clin Microbiol Infect.* 2022;28(11):1465–1470.
18. Zankari E. Comparison of the web tools ARG-ANNOT and ResFinder for detection of resistance genes in bacteria. *Antimicrob Agents Chemother.* 2014;58(8):4986.
19. Roer L., Kaya H., Tedim A. P. et al. VirulenceFinder for *Enterococcus faecium* and *Enterococcus lactis*: an enhanced database for detection of putative virulence markers by using whole-genome sequencing data. *Microbiol Spectr.* 2024;(1):e0372423.
20. Freire B., Ladra S., Parama J.R. Memory-Efficient Assembly Using Flye. *IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinform.* 2022;19(6):3564–3577.
21. Gomi R., Wyres K.L., Holt K.E. Detection of plasmid contigs in draft genome assemblies using customized Kraken databases. *Microb Genom.* 2021;7(4):000550.
22. Lu J., Rincon N., Wood D.E. et al. Metagenome analysis using the Kraken software suite. *Nat Protoc.* 2022;17(12):2815–2839.
23. Piccoli C., Munoz-Merida A., Crottini A. PARSID: a Python script for automatic analysis of local BLAST results for a rapid molecular taxonomic identification. *BMC Res Notes.* 2024;17(1):35.
24. Meakin G.E., Kokshoorn B., van Oorschot R.A., Szkuta B. Evaluating forensic DNA evidence: Connecting the dots. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science.* 2021;3(4):e1404.
25. Pope S., Puch-Solis R. Interpretation of DNA data within the context of UK forensic science investigation. *Emerging Topics in Life Sciences.* 2021;5(3):395–404.
26. Seemann T. Prokka: rapid prokaryotic genome annotation. *Bioinformatics.* 2014;30(14):2068–2069.

Информация об авторах / Information about the authors

Матвей Владимирович Спринджук

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси
(Республика Беларусь, г. Минск, ул. Сурганова, 6)
E-mail: stepanenkomatvei@yandex.ru

Matvey V. Sprindzhuk

Candidate of technical sciences,
senior scientist,
United Institute of Informatics Problems
of the Belarus National Academy of Sciences
(6 Surganova street, Minsk, Republic of Belarus)

Василий Иванович Берник

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт математики Национальной
академии наук Беларуси
(Республика Беларусь, г. Минск, ул. Сурганова, 11)
E-mail: bernik@im.bas-net.by

Vasiliy I. Bernik

Doctor of physical and mathematical sciences,
professor, chief researcher,
Institute of Mathematics of the National Academy
of Sciences of Belarus
(11 Surganova street, Minsk, Republic of Belarus)

Андрей Петрович Кончиц

кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт леса Национальной
академии наук Беларуси
(Республика Беларусь, г. Гомель,
ул. Пролетарская, 71)
E-mail: konchits@yandex.ru

Andrey P. Konchits

Candidate of biological sciences,
leading researcher,
Forest Institute of the National academy
of sciences of Belarus,
(71 Proletarskaya street, Gomel, Republic of Belarus)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 12.08.2024

Принята к публикации / Accepted 09.09.2024