

ВМ 4/2024 (Основан в 2005 году)

ВЕСТНИК МЕТРОЛОГА

Научно-технический журнал
Решением ВАК от 18.12.2017 года включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» («Перечень...» от 23.09.2022 г. за № 442).

Учредитель и издатель

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»

Почтовый адрес:

п/о Менделеево, Солнечногорский район, Московская область, 141570

Редакционный совет:

И.Ю. Блинов, доктор технических наук.
В.А.Вышков, доктор технических наук профессор.
С.С. Голубев, кандидат технических наук
О.В. Денисенко, доктор технических наук.
Ю.А. Клейменов, доктор технических наук
Д.А. Кузнецов
И.М. Малай, доктор технических наук.
Б.А. Сахаров, доктор технических наук.
Ф.И. Храпов, доктор технических наук.
В.В. Швыдун, доктор технических наук.
А.Н. Щипунов, доктор технических наук

Главный редактор

В.Н. Храменков, доктор технических наук, профессор

Заместитель главного редактора

О.В. Надеина, кандидат педагогических наук

В подготовке номера участвовали:

Крупская Д.Л., ФГУП «ВНИИФТРИ»

Адрес редакции: 141006, г. Мытищи Московской обл., Олимпийский проспект, владение 12, строение 1, оф. 404

Адрес для переписки, размещения рекламы и приобретения журнала «Вестник метролога»:

п/о Менделеево, Солнечногорский район, Московская область, 141570

Тел./факс (495) 586–23–88; (495) 580-35-66.

E-mail:32gniii_vm@mail.ru; vm@vniiftri.ru

Отпечатано ООО «ПРИНТ»

Юридический адрес: 125413, Россия, г. Ижевск,

Сдано в набор 15.10.2024

Подписано в печать 21.11.2024

Тираж 300 экз.

Зарегистрирован ISSN 2413–1806 в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77- 60016 от 21 ноября 2014 г.

Материалы журнала размещаются на сайте Научной электронной библиотеки и включаются в национальную информационно-аналитическую систему РИНЦ

СОДЕРЖАНИЕ

Измерения радиотехнических величин

Медведев И.Н., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Семёнов А.А., к.т.н., Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Влияние внешнего магнитного поля на плоскополяризованные электромагнитные волны дециметрового диапазона при радиолокационных измерениях 3

Оптические и оптико-физические измерения величин

Хатеев А.С., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Обеспечение поверки средств измерений относительного распределения плотности энергии лазерного излучения, входящих в состав комплексов контроля космического пространства, в местах их эксплуатации 5

Общие вопросы метрологии

Кувыкин Ю.А., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Супрунюк В.В., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Храменков В.Н., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Хайруллин Р.З., д.ф.-м.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Национальный исследовательский Московский

государственный строительный университет

Оценка эффективности контроля стабильности метрологических характеристик источников измерительной информации в процессе эксплуатации с использованием теории полумарковских моделей 8

Кабатов В.В., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,

Прокопишин В.Н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Некоторые современные проблемы традиционной метрологии

и пути их решения. Анализ перспектив и потенциала развития квантовой метрологии 12

Кочугуров Н.Е., АО «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз»

Целмс Р.Н., к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Скориантов Н.Н., к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский

государственный университет аэрокосмического приборостроения;

Руденкова Е.Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Вопросы дистанционной передачи измерительной информации для испытаний моделей кораблей и судов 16

Галеницкий А.В., к.т.н., Самородов Б.А., Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

Оценивание характеристик остаточного фона

электродинамического полигона закрытого типа 21

Измерения электрических величин

Мазур А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Вторичный эталон единицы электрического сопротивления

постоянного и переменного тока – резерв государственного

первичного эталона единицы электрического сопротивления

ГЭТ 14 30

Информация

К сведению авторов 36

Перечень научных статей, опубликованных в 2024 году . . . 38

VM 4/2024

Research magazine «Vestnik Metrologa»
«Vestnik Metrologa» magazine is published
and extends in Russian since 2005

«Vestnik Metrologa»

Scientific and technical journal

By the solution of VAK of 18.12.2017 it is
included in «The list of the reviewed
scientific

publications in which have to be the main
scientific results of theses for a degree of
the candidate of science, for a degree of
the doctor of science are published» («List»...
of 25.12.2017 for No. 2210).

FSUE VNIIFTRI Russian Metrological
Institute of Technical Physics and
Engineering You are: Publisher

Address: 141570, Moscow region,
Solnechnogorsk district., Township
Mendeleevo

The Editorial advice:

I.Y. Blinov, doctor of the technical sciences.
sciences.

V.A. Vyshlov, doctor of the technical
sciences, professor.

S.S. Golubev, candidate of the technical
sciences

O.V. Denisenko, doctor of the technical
sciences.

Y.A. Kleymenov, doctor of the technical
sciences

D.A. Kuznetsov

I.M. Malai, doctor of the technical sciences.

B.A. Saharov, doctor of the technical
sciences.

F.I. Hrapov, doctor of the technical
sciences.

V.V. SHvydun, doctor of the technical
sciences,

A.N. Shchipunov, doctor of the technical
sciences.

Editor-in-chief

V.N. Khramenkov, doctor of the technical
sciences, professor

Deputy main of the editor

O.V. Nadeina, candidate of the pedagogical
sciences

Address to editings: 141006, Mytishi
Moscow obl., Olympic avenue, possession
12, construction 1

Address: 141570, Moscow region,
Solnechnogorsk district., Township
Mendeleevo

telephone/fax (495) 586-01-00;

(495) 586-23-88.

E-mail: 32gniii_vm@mail.ru

It is Printed by OOO «Print»

Legal address: 426035, Russia, Izhevsk,
Timiryazeva st., 5.

telephone (3412) 56-95-53

The Circulation

300 copies

ISSN 2413–1806 Are Registered

in Federal service on control in sphere relationship, information
technology and mass communication. Certificate about registrations PI
№ FS77–60016 from November 21, 2014 Material of the journal take
seats on put Scientific electronic library and are included in national
information-analytical system RINC

CONTENTS

Measurements of radio engineering quantities

*Medvedev I.N., k.t.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of
the Russian Federation,
Semenov A.A., k.t.s., Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky*
Influence of an external magnetic field on plane-polarized
electromagnetic waves in the decimeter range during radar
measurements 3

Optic and optic-physical measurements

*Khateev A.S., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of
the Russian Federation*
Ensuring verification of measuring instruments for the relative
distribution of the energy density of laser radiation, which are part
of the space control complexes, in their places of operation 5

Common questions of a metrology

*Kuyykin Yu.A., k.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense
Suprunyuk V.V., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense
Khramenkov V.N., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation
Ministry of Defense*

*Khayrullin R.Z., d.ph.-m.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense
of the Russian Federation, Moscow State (National Research)
University of Civil Engineering*
Assessment of the efficiency of control of stability of metrological
characteristics of sources of measurement information in the
process of operation using the theory of semimarkov models 8

*Kabatov V.V., FSBI «MSHC» Russian Federation Ministry of Defense,
Prokopishin V.N., FSBI «MSHC» Russian Federation Ministry of Defense*
Some modern problems of traditional metrology and ways to solve
them. Analysis of the prospects and potential for the development
of quantum metrology 12

*Kochugurov N. E., Skoriantov N.N., PhD, Tech, Associate Professor
Tselms R. N., PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation;
Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense
of the Russian Federation*
Issues of remote transmission of measurement information
for testing models of ships and vessels 16

*Galenitsky A.V., k.t.s., Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky,
Samorodov B.A., Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky*
Evaluation of the closed-type electrodynamic test site
residual background characteristics 21

*Mazur A.V., k.t.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of the
Russian Federation*
Secondary standard of dc and ac electrical resistance units –
reserve of the state primary standard of electrical resistance units
GET 14 30

INFORMATION

NOTE AUTHORS 36

LIST SCIENTIFIC PUBLICATION IN 2024 38

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЛОСКОПОЛЯРИЗОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ THE EFFECT OF AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD ON PLANE POLARIZED ELECTROMAGNETIC WAVES IN THE DECIMETER RANGE DURING RADAR MEASUREMENTS

Медведев И.Н., к.т.н., ФГБУ «ГНМИЦ» Минобороны России; Семёнов А.А., к.т.н., Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
Medvedev I.N., k.t.s., FSBI «MSHC» of Russia Federation Ministry of Defense, Semenov A.A., k.t.s., Military Space Academy named
after A.F. Mozhaisky

E-mail: nmetrolog@yandex.ru; E-mail: vka@mil.ru
tel. +7 (926) 128-48-00; +7 (981) 722-60-94

Аннотация: Приводится математическое обоснование возможности формирования физических корреляционных связей влияния внешнего магнитного поля на плоскополяризованные электромагнитные волны дециметрового диапазона при радиолокационных измерениях. В качестве источника оценки дискретных изменений параметров магнитного поля предлагается использовать современные программные комплексы и модели. Адаптивные поправки для учета пространственных и суточных флуктуаций в радиолокационных измерениях обоснованы при помощи статистической оценки доступных эмпирических измерений.

Annotation: A mathematical justification is given for the possibility of forming physical correlations of the influence of an external magnetic field on plane-polarized electromagnetic waves of the decimeter range during radar measurements. It is proposed to use modern software systems and models as a source for estimating discrete changes in magnetic field parameters. Adaptive adjustments to account for spatial and diurnal fluctuations in radar measurements are based on a statistical assessment of available empirical measurements.

Ключевые слова: магнитное поле, адаптивные поправки, радиолокационные измерения.

Keywords: magnetic field, adaptive corrections, radar measurements.

Теоретическое рассмотрение вопроса

Синусоидальная волна с круговой поляризацией представляет собой совокупность двух ортогональных линейно-поляризованных гармонических колебаний, фазы которых смещены относительно друг друга на 90 градусов. Для формирования показателя вклада ионосферы в поляризационные характеристики вполне достаточно составляющей каждой обыкновенной и необыкновенной волны с круговой поляризацией.

Напряженность электрического поля двух линейно поляризационных бегущих волн представляется в форме фазовых постоянных обыкновенной и необыкновенной волн, где фазовые постоянные имеют корреляционные зависимости от коэффициента преломления сред и определяются с помощью фазовой скорости волны и угловой частоты распространяющегося колебания. Разность фаз двух электромагнитных волн, прошедших в ионизированной среде определенное расстояние, в спектре дискретных значений коэффициентов преломления на трассе распространения представляет собой разность фаз между двумя магнитно-ионными составляющими. Результирующий угол поворота плоскости поляризации представляет собой половину от этой величины. Таким образом, при учете двух указанных фактов полный угол поворота плоскости поляризации для случая распространения волны

до цели и обратно будет определять границы пути распространения радиоволн в ионосфере. Используя в качестве независимой переменной высоту h над поверхностью Земли, получим следующее выражение:

$$\varphi(s) = \frac{\omega}{c} \int_{h_1}^{h_2} \Delta n f(h) dh, \quad (1)$$

где

$$f(h) = \frac{r_0 + h}{[(r_0 + h)^2 - (r_0 \cos E)^2]^{1/2}}, \quad (2)$$

r_0 – радиус Земли и E – угол места луча антенны.

В соответствии с теорией распространения электромагнитных волн разность коэффициентов преломления обыкновенной и необыкновенной волны при квазипродольном распространении равна:

$$\Delta n = \frac{N_e e^3 H}{2\pi^2 m^2 c f^3}, \quad (3)$$

где N_e – плотность электронов в $\text{э}/\text{см}^2$; H – напряженность магнитного поля Земли в гауссах; e – заряд электрона ($4,8 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц); m – масса электрона ($9,1 \cdot 10^{-23}$ г); f – частота в герцах.

Подставляя выражение (3) в формулу (1), получаем, что полный угол поворота плоскости поляризации при распространении радиоволн до цели и обратно равен:

$$\varphi(h) = \frac{e^3}{\pi m^2 c f^2} \int_{h_1}^{h_2} f(h) H \cos \theta N_e dh, \quad (4)$$

где θ – угол распространения между вектором магнитного поля и направлением распространения волн.

Вводя значения соответствующих постоянных, получаем:

$$\varphi(h) = \frac{4,7233 \cdot 10^4}{f^2} \int_{h_1}^{h_2} f(h) H \cos \theta N_e dh, \quad (5)$$

где граничные высоты h_1 и h_2 выражены в сантиметрах. Следует отметить, что полная величина угла поворота плоскости поляризации прямо пропорциональна напряженности магнитного поля Земли и обратно пропорциональна квадрату частоты.

Практическое рассмотрение вопроса

Работа радиотехнических комплексов, использующих распространение радиоволн, во многом определяется оценкой погрешностей получаемых значений уровней радиосигналов [3]. Современные программные продукты имеют пакеты стандартных наборов функций для отображения большого спектра физических и технических процессов, а, в частности, и решения радиолокационных измерений дециметрового диапазона. Например, использование возможности пакета математического моделирования MATLAB позволило сформировать и разработать алгоритмическое функционирование радиолокационной станции с фазированной антенной решеткой (рисунок 1).

Разработки моделей и методов обработки радиолокационных измерений при помощи комплексной адаптивной пространственно-временной обработкой сигналов сопряжен с решением ряда целевых задач. Одной из центральной такой задачей является влияния внешнего магнитного поля на плоскополяризованные электромагнитные волны дециметрового диапазона при радиолокационных измерениях (рисунки 2, 3).

Таким образом, формирование и отображение любых физических процессов, в том числе и корреляционных связей влияния внешнего магнитного поля на плоскополяризованные электро-

магнитные волны дециметрового диапазона при радиолокационных измерениях, становятся все больше доступны для научных изысканий на базе современных программных продуктов.

Литература

1. Коростелев А.А., Ключев Н.Ф., Мельник Ю.А. и др. Теоретические основы радиолокации. Учебное пособие для вузов; Под ред. В.Е. Дулевича – 2-е изд., перераб. и доп. – М. Изд-во «Советское радио», С. 1978 – 608 с.
2. Дворов А.Н., Иванов А.А., Семёнов А.А. Аппаратно-программный комплекс оценки и анализа полученной радиолокационной информации в условиях спектральных изменений физических процессов визирования объектов // Научно-технический журнал «Вестник метролога» – Мытищи, Московская область: ВНИИ ФТРИ, 2023: С. 13–14
3. Семёнов А.А. Методика получения значений сигнал-шум на выходе синтезированной антенной решетки ультразвукового стенда при наличии различного типа активной помехи // Научный журнал «Вестник Новгородского государственного университета». Великий Новгород: НГУ, 2023, выпуск № 3 (132), технические науки. С. 419–425.

References

1. Korostelev A.A., Klyuev N.F., Melnik Yu.A. and others. Theoretical foundations of radar. Textbook for universities; Edited by V.E. Dulevich – 2nd ed., reprint. and additional – M. Publishing house «Soviet Radio», p.1978 – 608 p.
2. Dvorov A.N., Ivanov A.A., Semenov A.A. Hardware and software complex for evaluating and analyzing received radar information in conditions of spectral changes in physical processes of object sighting // Scientific and Technical journal “Bulletin of Metrology” – Mytishchi, Moscow region: VNII FTTRI, 2023: pp. 13–14
3. Semenov A.A. Method of obtaining signal-to-noise values at the output of a synthesized antenna array of an ultrasonic stand in the presence of various types of active interference // Scientific journal “Bulletin of the Novgorod State University”. Veliky Novgorod: NSU, 2023, issue No. 3 (132), Technical Sciences. pp. 419–425.

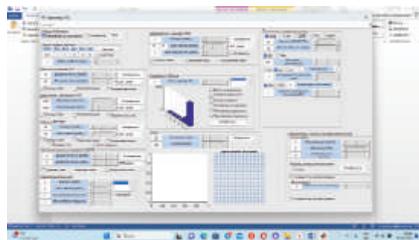


Рисунок 1 – Программный продукт для моделирования функционирования радиолокационной станции с фазированной антенной решеткой.

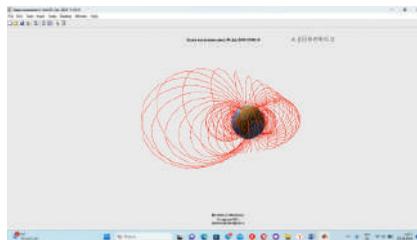


Рисунок 2 – Моделирование магнитного поля Земли

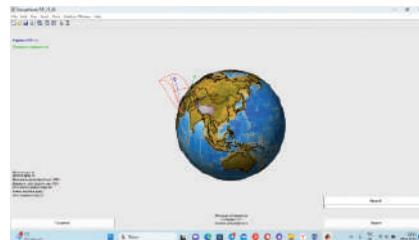


Рисунок 3 – Моделирование функционирования радиолокационной станции дециметрового диапазона при радиолокационных измерениях

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ КОМПЛЕКСОВ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, В МЕСТАХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ENSURING VERIFICATION OF MEASURING INSTRUMENTS FOR THE RELATIVE DISTRIBUTION OF THE ENERGY DENSITY OF LASER RADIATION, WHICH ARE PART OF THE SPACE CONTROL COMPLEXES, IN THEIR PLACES OF OPERATION

Хатеев А.С., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Khateev A.S., head of the laboratory of the Federal State Budgetary Institution «GNMC» of the Russian Ministry of Defense
E-mail: has681@mail.ru, тел. +7 (925) 344-58-47

Аннотация: Предложен метод поверки средств измерений (СИ) относительного распределения плотности энергии (ОРПЭ) лазерного излучения, входящих в состав комплексов контроля космического пространства (КККП), в местах их эксплуатации, который основан на прямых измерениях ОРПЭ одновременно эталонным преобразователем лазерного излучения и поверяемым средством измерений в фокальной плоскости собирающей линзы. Описана математическая модель погрешности средств измерений для разработанного метода.

Annotation: A method is proposed for verifying measuring instruments (SI) of the relative energy density distribution (ORPE) of laser radiation, which are part of the space control complexes (RCMP), in their places of operation, which is based on direct measurements of the ORPE simultaneously by a reference laser radiation converter and a verifiable measuring instrument in the focal plane of the collecting lens. A mathematical model of the error of measuring instruments for the developed method is described.

Ключевые слова: лазерное излучение, относительное распределение плотности энергии, поверка.
Keywords: laser radiation, relative distribution of energy density, verification.

Сведения о пространственно-энергетических характеристиках импульсных лазеров основаны на использовании данных об ОРПЭ в поперечном сечении пучка как в ближней, так и в дальней зонах. ОРПЭ $H(x, y, z)$ лазерного пучка характеризуется пространственным распределением плотности излучаемой энергии, получаемой экспериментально. Оси координат x, y, z определяют ортогональные направления в пространстве системы координат. Ось z является продольной и соответствует направлению распространения лазерного пучка. ОРПЭ является основной интегральной характеристикой поля излучения импульсных лазеров, по которой вычисляются все частные величины, например, ширина лазерного пучка, угол расходимости, параметр M^2 и другие.

Координаты центра ОРПЭ в поперечном сечении лазерного пучка, являющиеся моментами первого порядка ОРПЭ, описываются выражениями, приведенными в [1]. Под шириной лазерного пучка $d_{\sigma_x}, d_{\sigma_y}$ вдоль осей x и y понимаются протяженность распределения плотности энергии в поперечном сечении лазерного пучка с продольной координатой z вдоль главной оси, ближайшей к x или y оси системы координат соответственно, базирующуюся на центральных моментах второго порядка ОРПЭ. Выражения для ширины лазерного пучка по осям x и y имеют вид [1]

$$d_{\sigma_x}(z) = 2\sqrt{2}\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2|\sigma_{xy}^2|}, \quad (1)$$

$$d_{\sigma_y}(z) = 2\sqrt{2}\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2|\sigma_{xy}^2|}. \quad (2)$$

Для измерений расходимости лазерного пучка в оптический тракт вводится фокусирующий элемент (собирающая линза) с фокусным расстоянием f , так, чтобы его оптическая ось была перпендикулярна оси измеряемого пучка. Фокусирующий элемент формирует в фокальной плоскости дальнюю зону излучения.

Углы расходимости определяются по результатам измерений ширины лазерного пучка в дальней зоне излучения по соответствующим осям на одинаковом фокусном расстоянии f в соответствии с выражениями [1]

$$\theta_{\sigma_x} = \frac{d_{\sigma_x f}}{f}, \quad (3)$$

$$\theta_{\sigma_y} = \frac{d_{\sigma_y f}}{f}. \quad (4)$$

В дальней зоне образуется искусственная перетяжка луча, где значения ширины лазерного пучка по соответствующим осям достигают минимальных значений по сравнению с другими сечениями вдоль распространения излучения. Схематично формирование дальней зоны излучения приведено на рисунке 1.

Местоположения перетяжек лазерного пучка z_{ox} и z_{oy} приведены на рисунке 2.

Стоит отметить, что выражения 1–4 распространяются только на стигматические (гомоцентрические) и слабостигматические пучки лазерного излучения.

Лазерные пучки на выходе лазерных систем могут иметь различные распределения интенсивности от импульса к импульсу. Например, для одномодовых и маломодовых лазеров распределение интенсивности преимущественно является гауссовым или близким к нему. Для многомодовых волокон, которые используются в мощных волоконных и диодных лазерах, распределение описывается более сложными функциями [2].

Как правило, лазеры из состава КККП имеют высокую выходную энергию излучения и большую, по сравнению с СИ, апертуру резонатора, что делает невозможным проведение измерений пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения в ближней зоне и для этих целей проводятся измерения только в дальней зоне с применением матричных измерителей лазерного излучения.

Кроме того, СИ ОРПЭ лазерного излучения на КККП применяется перед каждым их использованием по назначению, что существенно ограничивает возможность их изъятия для отправки в поверочный орган.

В целях организации поверки СИ ОРПЭ лазерного излучения в местах эксплуатации КККП разработан метод, основанный на прямых измерениях ОРПЭ одновременно эталонным преобразователем лазерного излучения и поверяемым СИ в фокальной плоскости собирающей линзы.

Обобщенная структурная схема метода приведена на рисунке 3.

Суть метода заключается в установке на расстоянии f от собирающей линзы (в фокальной плоскости) диффузного экрана, отражающего падающее на него лазерное излучение по закону Ламберта. На одинаковом расстоянии $l_1 = l_2$ и под одним углом $\varphi_1 = \varphi_2$ к диффузному экрану, расположенному максимально близко к проходящему пучку лазерного излучения, устанавливаются эталонный преобразователь и поверяемое СИ в соответствии с рисунком 4.

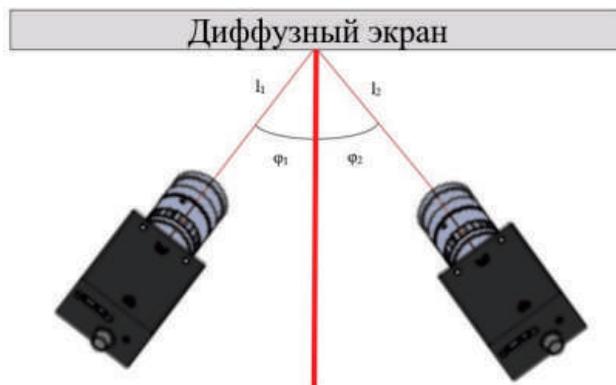


Рисунок 4 – Схема установки эталонного преобразователя и поверяемого СИ ОРПЭ лазерного излучения

Расстояния l_1 и l_2 измеряется с помощью линейки измерительной с верхним пределом измерений не ниже 500 мм, а углы φ_1 и φ_2 – с помощью угломера с нониусом с диапазоном измерений от 0 до 180°.

Затем подается импульс лазерного излучения от лазера из состава КККП и проводятся одновременные измерения пространственно-энергетических характеристик лазерного пучка, в частности ОРПЭ.

Неисключенная систематическая погрешность (НСП) измерений расстояния до плоскости перетяжки лазерного пучка θ_{z0} рассчитывается с помощью выражения 5, после чего определяется среднее

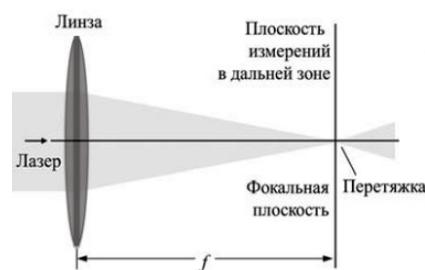


Рисунок 1 – Формирование дальней зоны лазерного пучка

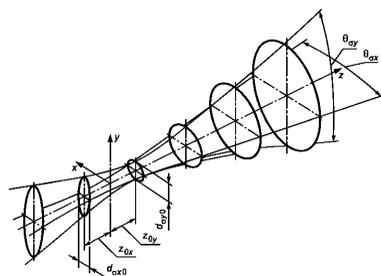


Рисунок 2 – Местоположение перетяжки лазерного пучка, формируемое в дальней зоне

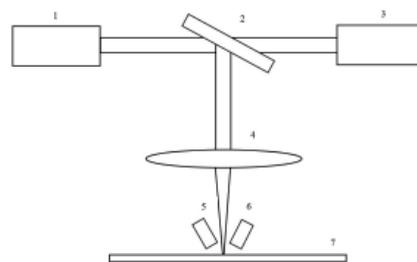


Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема метода поверки СИ ОРПЭ:
 1 – лазер из состава образца ВВСТ; 2 – пластина светоделительная;
 3 – поглотитель лазерного излучения;
 4 – фокусирующая линза; 5 – эталонный преобразователь лазерного излучения;
 6 – поверяемое СИ; 7 – диффузный экран

квадратическое отклонение (СКО) результата измерений до плоскости перетяжки лазерного пучка σ_{z_0} .

$$\theta_{z_0} = \left| \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

где f_{\max} и f_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения фокусного расстояния, мм.

НСП θ_{φ} , обусловленная неточностью определения фокусного расстояния, определяется в соответствии с выражением

$$\theta_{\varphi} = \frac{\delta}{\bar{f}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где δ – допуск на фокусное расстояние в соответствии с эксплуатационной документацией на линзу, мм; \bar{f} – среднее значение фокусного расстояния для n -измерений, мм.

Проводится серия из n измерений ($n = 5$) ОРПЭ поверяемым СИ, определяется среднее арифметическое значение и проводится оценка СКО резуль-

тата измерений ОРПЭ σ_H по известным выражениям [3].

НСП $\theta_{\text{эт}}$, обусловленная погрешностью измерений эталонного преобразователя лазерного излучения, устанавливается в соответствии с эксплуатационной документацией на него и составляет 2,5 %.

НСП θ_{φ} , обусловленная погрешностью измерений угла φ , устанавливается в соответствии с эксплуатационной документацией на СИ угла и определяется СКО σ_{φ_1} и σ_{φ_2} результатов измерений углов φ_1 и φ_2 .

НСП θ_l , обусловленная погрешностью измерений длины l , устанавливается в соответствии с эксплуатационной документацией на СИ длины и определяется СКО σ_{l_1} и σ_{l_2} результатов измерений длины l_1 и l_2 .

СКО результатов измерений до плоскости перетяжки лазерного пучка σ_{z_0} результатов измерений углов σ_{φ_1} и σ_{φ_2} и результатов измерений длины σ_{l_1} и σ_{l_2} определяется известным способом [3].

Математическая модель погрешности поверки описывается следующим выражением [4]

$$\delta_i = 1,4 \cdot \sqrt{\frac{\theta_{z_0}^2 + \theta_{\theta}^2 + \theta_{\varphi}^2 + \theta_{l_1}^2 + \theta_{l_2}^2}{3} + \sigma_{z_0}^2 + \sigma_{\varphi_1}^2 + \sigma_{\varphi_2}^2 + \sigma_{l_1}^2 + \sigma_{l_2}^2 + \sigma_H^2}, \quad (7)$$

где σ_{z_0} – СКО результата измерений расстояния до плоскости перетяжки лазерного пучка, %; θ_{z_0} – НСП определения расстояния до плоскости перетяжки лазерного пучка, %; θ_{θ} – НСП, обусловленная неточностью определения фокусного расстояния, %; $\theta_{\text{эт}}$ – НСП, обусловленная погрешностью измерений эталонного преобразователя ОРПЭ, %; θ_{φ} – НСП обусловленная погрешностью измерений угла φ , %; σ_{φ_1} и σ_{φ_2} – СКО результатов измерений углов φ_1 и φ_2 соответственно, %; θ_{l_1} – НСП, обусловленная погрешностью измерений длины, %; σ_{l_1} и σ_{l_2} – СКО результатов измерений длины l_1 и l_2 соответственно, %; σ_H – СКО результатов измерений ОРПЭ поверяемым СИ, %.

Апробация разработанного метода проведена в месте эксплуатации КККП и показала свою применимость на практике.

Таким образом, разработан метод, отличающийся использованием прямых измерений ОРПЭ лазерного излучения одновременно эталонным приемником и поверяемым СИ в фокальной плоскости собирающей линзы и инвариантностью к характерной для лазерного излучения нестабильности его параметров от импульса к импульсу, что позволяет экономить технический ресурс лазеров, повысить оперативность

метрологического обеспечения КККП и сократить материальные затраты на его проведение.

Литература.

- ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки. Москва, Стандартинформ, 2010. – 20 с.
- Мацак И.С. Метод и экспериментальная установка для прецизионного измерения характеристик широкоапертурных пучков непрерывного лазерного излучения: диссертация кандидата технических наук: 01.04.01 / Мацак Иван Сергеевич. – Москва, 2019. – 152 с.
- ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Москва, Стандартинформ, 2019. – 26 с.
- Хатеев А.С., Козак И.В., Жуков Д.В. Совершенствование метрологического обеспечения средств измерений параметров лазерного излучения из состава комплексов контроля космического пространства // Материалы 49 Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов военных метрологов «Актуальные задачи военной метрологии». – Кубинка, Московская область, 2024. – С. – 231-234.

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИСТОЧНИКОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ПОЛУМАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ
ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF CONTROL OF STABILITY OF METROLOGICAL
CHARACTERISTICS OF SOURCES OF MEASUREMENT INFORMATION IN THE PROCESS OF OPERATION
USING THE THEORY OF SEMI-MARKOV MODELS**

Кувыкин Ю.А., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Супрунюк В.В., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Храменков В.Н., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Хайруллин Р.З., д.ф.-м.н. ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Kuvykin Yu.A., k.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense,
Suprunyuk V.V., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense,
Khramenkov V.N., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense,
Khayrullin R.Z., d.ph-m.s., FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
Moscow State (National Research) University of Civil Engineering
E-mail: original.rus@mail.ru; 32gnii@mail.ru; 32gniii_vm@mail.ru; hvn2012@mail.ru
tel. 8(977)268-75-98; 8(498)684-75-67

Аннотация: Представлены результаты оценки эффективности контроля стабильности метрологических характеристик источников измерительной информации в процессе эксплуатации с использованием теории полумарковских моделей. Для этой цели выполнено моделирование процесса эксплуатации источников измерительной информации на объекте установки. Особенностью моделирования является одновременное рассмотрение состояний источников измерительной информации в процессе эксплуатации по двум контурам: классической поверки и контроля стабильности их метрологических характеристик. По результатам моделирования сделано заключение, что рациональным подбором периодичности поверки и контроля, а также определением допустимого уровня исключения из работы некоторых однотипных источников измерительной информации, можно добиться необходимых значений их коэффициента готовности.

Annotation: The article presents the results of the assessment of the efficiency of control over the stability of metrological characteristics of measurement information sources during operation using the theory of semi-Markov models. For this purpose, the process of operation of measurement information sources at the installation site was simulated. The peculiarity of the modeling is the simultaneous consideration of the states of measurement information sources during operation along two contours: classical verification and control over the stability of their metrological characteristics. Based on the modeling results, it is concluded that the necessary values of their readiness factor can be achieved by rational selection of the frequency of verification and control, as well as by determining the permissible level of exclusion from operation of some similar sources of measurement information.

Ключевые слова: источники измерительной информации, полумарковская модель.

Keywords: sources of measurement information, semi-markov model.

В работах [1–6], посвященных вопросам моделирования процессов эксплуатации измерительной техники, задача оценки эффективности контроля стабильности ее метрологических характеристик не рассматривалась.

Для прогнозирования развития измерительной техники целесообразно провести оценку эффективности указанного контроля с использованием теории полумарковских моделей. Для этой цели потребовалось смоделировать процесс эксплуатации источников измерительной информации (далее – источников) на объекте установки, учитывающих состояния их нахождения: в состоянии классической поверки и состоянии контроля стабильности их метрологических характеристик.

Опишем возможные состояния источников в процессе эксплуатации: E_1 – исправное состояние; $E_1^{(1)}$, $E_1^{(2)}$, $E_1^{(3)}$, $E_1^{(4)}$ – вспомогательные исправные состояния, введенные для возможности моделирования разного времени нахождения в исправном состоянии перед переходом в неисправные состояния и на поверку; $E_2^{(1)}$, $E_2^{(2)}$ – состояния неисправности перед переходом источников в состояния поверки и состояния контроля; E_3 – поверка неисправной источников; E_4 – восстановление неисправных источников; E_5 – поверка исправных источников; E_6 – состояние ложного отказа источников; $E_6^{(1)}$, $E_6^{(2)}$ – вспомогательные состояния ложного отказа перед переходом в состояние поверки или контроля; E_{33} – контроль неисправных источников; E_{44} – восстановление после обнару-

жения неисправности при контроле; $E_{44}^{(1)}$, $E_{44}^{(2)}$ – вспомогательные состояния перед переходом в состояния исправное и полного отказа (для прохождения восстановления с демонтажом); E_{55} – контроль в состоянии исправности источников; E_{66} – состояние ложного отказа источников после

контроля; $E_{66}^{(1)}$, $E_{66}^{(2)}$ – вспомогательные состояния ложного отказа источников перед переходом в состояние очередного контроля и в состояние проверки неисправных источников, соответственно.

Граф модели процесса эксплуатации источников имеет вид (рисунок 1).

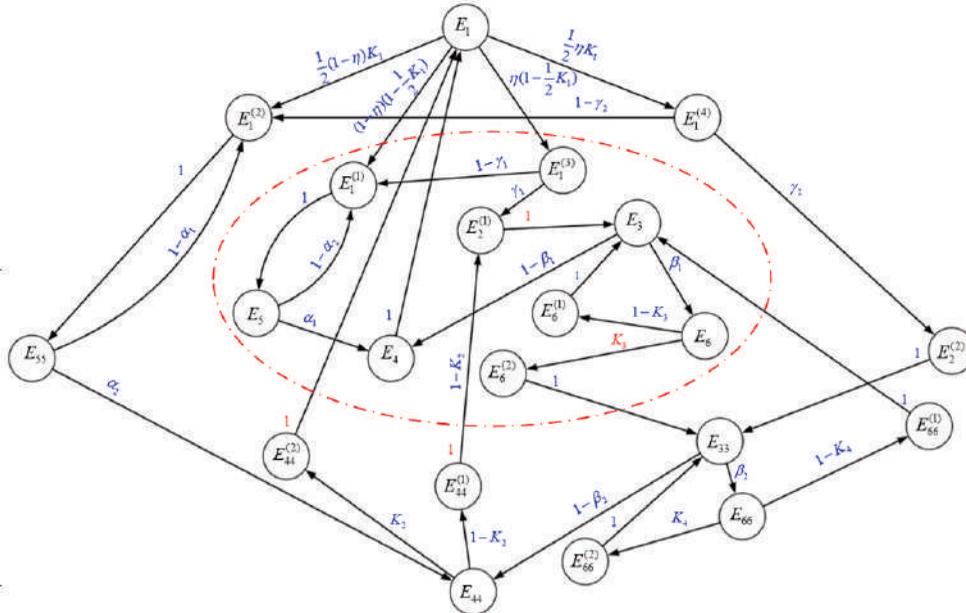


Рисунок 1 – Граф модели эксплуатации источников

Внутри красной штрихпунктирной линии находятся состояния источников, входящие в контур проверки, а вне этой линии – состояния контроля.

Модель представим структурно в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \pi_4 + \pi_{44}^{(2)}, \pi_1^{(1)} = (1-\eta)(1-\frac{1}{2}K_1)\pi_1 + (1-\gamma_1)\pi_1^{(3)} + (1-\alpha_1)\pi_5, \\ \pi_1^{(2)} &= 0,5(1-\eta)K_1\pi_1 + (1-\gamma_2)\pi_1^{(4)} + (1-\alpha_2)\pi_{55}, \pi_1^{(3)} = \eta(1-\frac{1}{2}K_1)\pi_1, \pi_1^{(4)} = 0,5\eta K_1\pi_1, \\ \pi_2^{(1)} &= \gamma_1\pi_1^{(3)}, \pi_2^{(2)} = \gamma_2\pi_1^{(4)}, \pi_3 = \pi_2^{(1)} + (1-K_3)\pi_6^{(1)} + \pi_{66}^{(1)}, \pi_4 = (1-\beta_1)\pi_3 + \alpha_1\pi_5, \\ \pi_5 &= \pi_1^{(1)}, \pi_6 = \beta_1\pi_3, \pi_6^{(1)} = (1-K_3)\pi_6, \pi_6^{(2)} = K_3\pi_6, \pi_{33} = \pi_2^{(2)} + \pi_6^{(2)} + \pi_{66}^{(1)}, \\ \pi_{44} &= (1-\beta_2)\pi_{33} + \alpha_2\pi_{55}, \pi_{44}^{(1)} = (1-K_2)\pi_{44}, \pi_{44}^{(2)} = K_2\pi_{44}, \pi_{55} = \pi_1^{(2)}, \pi_{66}^{(2)} = \beta_2\pi_{33}, \\ \pi_{66}^{(1)} &= (1-K_4)\pi_{66}, \pi_{66}^{(2)} = K_4\pi_{66}. \end{aligned}$$

Где: α_1 и α_2 – условные вероятности ложного отказа при проверке и контроле, соответственно; β_1 и β_2 – условные вероятности необнаруженного отказа при проверке и контроле, соответственно; γ_1 и γ_2 – вероятности отказов на интервале между двумя последовательными проверками и между двумя последовательными циклами контроля, соответственно; K_1 – полнота выполнения контроля; K_2 – доля источников полностью восстановленная после контроля; K_3 – доля источников, попадающая из состояния необна-

руженного отказа после проверки в состояние контроля; K_4 – доля источников, попадающая из состояния необнаруженного отказа после контроля в состояние проверки; η – коэффициент, характеризующий долю переходов из состояния работоспособные в состояние неработоспособные или в состояние проверки работоспособных источников.

Определитель представленной системы уравнений равен нулю. Следовательно, вместо одного из уравнений можно использовать условие нормировки:

$$\pi_1 + \sum_{s=1}^4 \pi_1^{(s)} + \pi_2^{(1)} + \pi_2^{(2)} + \sum_{i=3}^6 \pi_i + \pi_6^{(1)} + \pi_6^{(2)} + \pi_{33} + \pi_{44} + \pi_{44}^{(1)} + \pi_{44}^{(2)} + \pi_{55} + \pi_{66} + \pi_{66}^{(1)} + \pi_{66}^{(2)} = 1$$

В этом случае определитель системы уравнений становится отличным от нуля, и она будет иметь единственное решение. Решение системы уравнений осуществляется методом обратной матрицы.

Коэффициент готовности источников к применению по назначению вычисляется как отношение суммы произведений вероятностей нахождения в их работоспособных состояниях на среднее время (математическое ожидание) нахождения в указанных состояниях к сумме произведений вероятностей $\pi_{*}^{(*)}$ нахождения во всех состояниях на среднее время (математическое ожидание времени) $\psi_{*}^{(*)}$ нахождения во всех состояниях:

$$K_r = (\psi_1 \pi_1 + \psi_1^{(1)} \pi_1^{(1)} + \psi_1^{(2)} \pi_1^{(2)} + \psi_1^{(3)} \pi_1^{(3)} + \psi_1^{(4)} \pi_1^{(4)}) / Z,$$

где $Z = \psi_1 \pi_1 + \psi_1^{(1)} \pi_1^{(1)} + \psi_1^{(2)} \pi_1^{(2)} + \psi_1^{(3)} \pi_1^{(3)} + \psi_1^{(4)} \pi_1^{(4)} + \psi_2^{(1)} \pi_2^{(1)} + \psi_2^{(2)} \pi_2^{(2)} + \psi_3 \pi_3 + \psi_{33} \pi_{33} + \psi_4 \pi_4 + \psi_5 \pi_5 + \psi_6 \pi_6 + \psi_{44} \pi_{44} + \psi_{44}^{(1)} \pi_{44}^{(1)} + \psi_{44}^{(2)} \pi_{44}^{(2)} + \psi_{55} \pi_{55} + \psi_6^{(1)} \pi_6^{(1)} + \psi_6^{(2)} \pi_6^{(2)} + \psi_{66} \pi_{66} + \psi_{66}^{(1)} \pi_{66}^{(1)} + \psi_{66}^{(2)} \pi_{66}^{(2)}.$

Времена нахождения в состояниях задавались следующим образом: $\psi_1=0,1$, $\psi_1^{(1)}=\tau_1$, $\psi_1^{(2)}=\tau_2$, $\psi_1^{(3)}=0,1$, $\psi_1^{(4)}=0,1$, $\psi_2^{(1)}=T_{II}-\tau_1$, $\psi_2^{(2)}=T_{MCK}-\tau_2$, $\psi_3=2$, $\psi_4=1$, $\psi_5=2$, $\psi_6=0,1$, $\psi_6^{(1)}=T_R$, $\psi_6^{(2)}=0,1$, $\psi_{33}=0,5$, $\psi_{44}=1$, $\psi_{44}^{(1)}=3$, $\psi_{44}^{(2)}=3,1$, $\psi_{55}=0,5$, $\psi_{66}^{(1)}=T_{II}$, $\psi_{66}^{(2)}=T_{MCK}$.

Здесь τ_1 – случайная величина, равная времени нахождения в работоспособном состоянии за период между поверками T_{II} и τ_2 – случайная величина, равная времени нахождения в работоспособном состоянии за период между проведением контроля T_{MCK} . В дальнейшем будем использовать приведенные значения периодичности контроля $\theta_{MCK} = T_{MCK} / T_{PEF}$ и поверки $\theta_{II} = T_{II} / T_{PEF}$, где T_{PEF} – периодичность проведения регламентных работ.

Результаты расчетов в обобщенном графическом виде приведены на рисунках 2–5.

Из рисунка 2 видно, что максимальное значение коэффициента готовности достигается при рациональном выборе периодичности контроля.

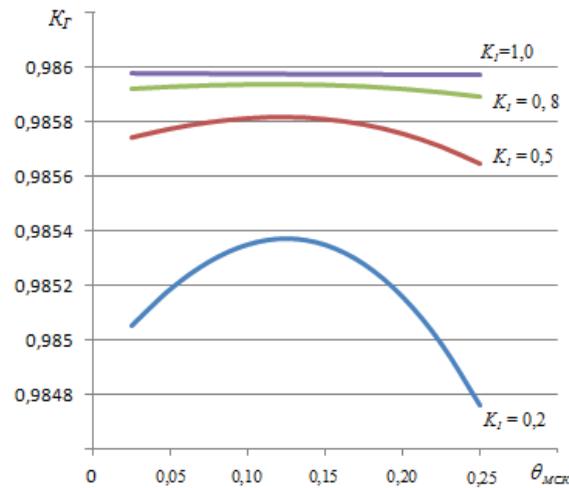


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента готовности от приведенной периодичности θ_{MCK} и полноты выполнения контроля

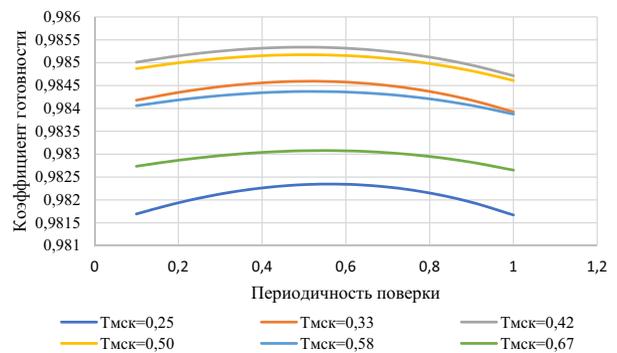


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента готовности от приведенной периодичности поверки и приведенной периодичности контроля

Данные рисунка 3 свидетельствуют о том, что для каждого значения T_{MCK} существует такое значение T_{II} , при котором достигается максимум K_r (в плоскости зависимости параметров T_{II} и T_{MCK} существует единственная внутренняя точка, в которой достигается максимум K_r).

Следует отметить, что частое проведения контроля приводит к некоторому уменьшению максимального значения K_r . Однако при этом может увеличиться достоверность принятия правильного решения о реальном состоянии источников. Указанную достоверность можно оценить с помощью вероятности:

$$P(\theta_{II}, \theta_{MCK}) = \pi_5(\alpha_1, \theta_{II}, \theta_{MCK}) \cdot \alpha_1 + \pi_{55}(\alpha_2, \theta_{II}, \theta_{MCK}) \cdot \alpha_2 + \psi_{55} + \pi_6(\beta_1, \theta_{II}, \theta_{MCK}) \cdot \psi_6 + \pi_{66}(\beta_1, \theta_{II}, \theta_{MCK}) \cdot \psi_{66},$$

где вероятности нахождения в состояниях зависят как от θ_{II} и θ_{MCK} , так и от условных вероятностей ложного и необнаруженного отказа, а также

$$S(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) = C_1 \cdot (\pi_5(\alpha_1) \cdot \alpha_1 \cdot \psi_5 + \pi_{55}(\alpha_2) \cdot \alpha_2 \cdot \psi_{55}) + C_2 \cdot (\pi_6(\beta_1) \cdot \beta_1 \cdot \psi_6 + \pi_{66}(\beta_2) \cdot \beta_2 \cdot \psi_{66}),$$

где C_1, C_2 – постоянные неотрицательные величины, характеризующие издержки того, что работоспособные источники признаются неработоспособными и отказавшие признаются работоспособными, соответственно.

На рисунке 4 изображена зависимость вероятности ошибки S от периодичности контроля.

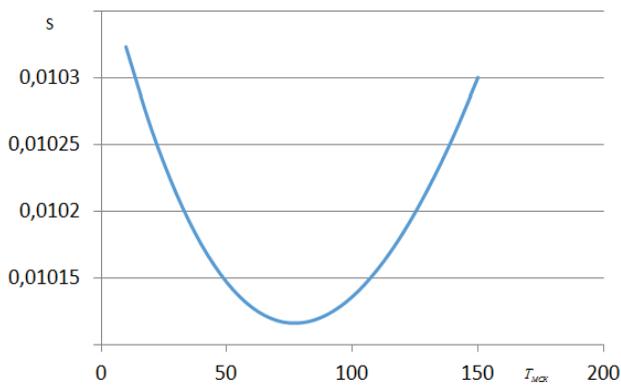


Рисунок 4 – Зависимость вероятности ошибки S от периодичности контроля

Данные рисунка 4 показывают, что имеется явно выраженный минимум вероятности ошибки при правильном выборе периодичности контроля. Применение контроля снижает вероятность получения недостоверной информации о состоянии источников.

Особенностью предложенной в статье модели является введение в модель дополнительных состояний для ожидания переходов в различные другие состояния. Положительные результаты данного приема были отмечены в работах [3, 4, 5]. Дополнительные состояния использовались, в том числе, для одновременного моделирования циклов поверки и контроля, переходы в которые из основного состояния осуществляются в детерминированные моменты времени. Параметры модели, с помощью которых задаются вероятности переходов в дополнительные состояния, могут быть вычислены на основе статистической обработки данных за предшествующий период эксплуатации источников. При этом время ожидания в указанных дополнительных состояниях

от вероятности ошибки (среднего ущерба, связанного с нахождением источников в состояниях ложного и необнаруженного отказов):

также детерминировано, и выбирается достаточно малым, чтобы не оказывать существенного влияния в процесс функционирования источников. Использование дополнительных состояний незначительно меняет вероятности нахождения в обобщенном состоянии (исходном и всех дополнительных), что позволяет моделировать процессы перехода источников в процессе эксплуатации в неработоспособные состояния, состояния поверки и контроля.

Результаты оценки эффективности контроля стабильности метрологических характеристик источников измерительной информации на объекте установки показали, что можно рациональным подбором периодичности поверки и контроля добиться необходимых значений коэффициента их готовности к применению по назначению. При этом может быть рассмотрена ситуация, когда периодичность классической поверки совпадет с периодичностью проведения регламентных работ объекта, на котором установлены источники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев Е. И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники. Москва: Военное издательство, 1993. 399 с.
2. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры / Е.И. Сычев. – Москва: РИЦ «Татьянин день», 1993 (1994). – 274 с. ISBN 5–85327–009–5.
3. Мищенко В.И., Кравцов А.Н., Мамлеев Т.Ф. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учётом периодичности поверки. Измерительная техника. 2021;(4):22–27. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-4-22-27>.
4. Хайруллин Р.З. Полумарковская модель эксплуатации и обновления парка измерительной техники. Вестник метролога. 2023. № 1. с.11–17.
5. Ershov D.S., Malakhov A.V., Talalai A.V., Khayrullin R.Z. Analysis of operation models of complex technical systems. Measuring Techniques. (2023) 2:2. № 8. DOI 10.1007/s11018-023-02248-z.
6. Хайруллин Р.З. Оптимизация процессов эксплуатации и обновления парка измерительной техники. Измерительная техника. 2022;(8):28–34. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-28-34>.

НЕКОТОРЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАДИЦИОННОЙ МЕТРОЛОГИИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ. АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ И ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ

SOME MODERN PROBLEMS OF TRADITIONAL METROLOGY AND WAYS TO SOLVE THEM. ANALYSIS OF THE PROSPECTS AND POTENTIAL FOR THE DEVELOPMENT OF QUANTUM METROLOGY

Кабатов В.В., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
 Прокопийшин В.Н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
 Kabatov V.V., FSBI «MSHC» Russian Federation Ministry of Defense,
 Prokopishin V.N., FSBI «MSHC» Russian Federation Ministry of Defense
 E-mail: 32gnii@mil.ru; tel. +7(495) 586-23-88
 voldkab@yandex.ru; tel. 8(985)664-43-40

Аннотация: В статье проанализированы современные проблемы традиционной метрологии и пути их решения с использованием перспективных квантовых систем, обеспечивающих увеличение точности измерений по сравнению с классическими методами. Рассмотрена концепция квантовой запутанности и ее использование в квантовой метрологии для повышения точности измерений. Цель настоящей статьи – привлечение внимания специалистов-метрологов к квантовой метрологии и рассмотрение тенденций ее развития.

Annotation: The article discusses the current problems of traditional metrology and ways to solve them using quantum systems, which provide more accurate measurements compared to classical methods. The concept of quantum entanglement and its use in quantum metrology to improve the accuracy of measurements are considered. The purpose of this article is to draw the attention of metrologists to quantum metrology and to consider the trends in its development.

Ключевые слова: традиционная метрология, квантовая метрология, фундаментальные физические константы.

Keywords: traditional metrology, quantum metrology, fundamental physical constants.

Традиционная метрология (ТМ) основана на классических физических принципах и методах измерений, которые ограничены пределами классической физики (фундаментальные пределы классической физики устанавливаются принципом неопределенности Гейзенберга – чем точнее измеряется одна характеристика частицы, тем менее точно можно измерить вторую [1]).

С развитием новых технологий ТМ сталкивается с рядом современных проблем, таких как:

- ограничения, налагаемые законами классической физики (в механических системах скорость составляющих их объектов намного ниже скорости света);

- ограничения точности и чувствительности измерений (появление новых материалов и средств более точного измерения поверхностных характеристик приводят к низкой пропускной способности средств ТМ и контроля, их недостаточной чувствительности и разрушающим методам контроля);

- риски появления методических погрешностей при программной обработке измерительной информации, связанные с неадекватностью используемых алгоритмов, неустойчивостью результатов относительно исходных данных;

- практическое отсутствие новых подходов к метрологическому обеспечению (МЛО) (бездемонтажные и дистанционные методы поверки и калибровки);

- влияние внешних воздействующих факторов (ВВФ) (климатические, электрические и магнитные, внешние нагрузки-вибрации, ударные нагрузки, внешние касания деталей приборов, ионизирующие излучения, газовый состав атмосферы, при которых изменяются истинные значения измеряемых величин);

- тепловые флуктуации (шумы, которые принципиально ограничивают точность измерений и создают суммарный фон, служащий естественной физической границей чувствительности приборов);

- отсутствие контроля метрологических характеристик средств измерений (СИ) в процессе эксплуатации изделия от поверки до поверки;

- недостаток измерительных возможностей, устаревание нормативно-правовой и нормативно-технических баз (требования к повышению точности измерений влекут обновление национальных эталонов ведущих стран мира каждые 10–15 лет);

– неразвитость системы мониторинга, анализа и отсутствие механизма прогнозирования потребностей и объема парка СИ (не проводится анализ о соотношении импортного и отечественного измерительного оборудования);

– неоднозначное понимание целей и задач МЛО, особенно в отношении процесса производства;

– кадровый вопрос (нехватка специалистов по метрологическим специальностям, необходимость непрерывного повышения квалификации специалистов в условиях быстрого технологического развития);

– снижение эффективности государственного метрологического надзора;

– недостаточная эффективность проведения фундаментальных научных исследований.

Квантовая метрология (КМ) [2, 3, 4, 5] позволит в дальнейшем преодолеть многие из перечисленных выше ограничений, используя квантовые системы, обеспечивающие более точные измерения, чем позволяют классические методы. КМ – это быстроразвивающаяся область, которая имеет большой потенциал для дополнения и расширения раздела ТМ в ближайшем будущем. КМ направлена на использование квантовой механики для повышения точности измерений, в развитии ТМ она может революционизировать различные отрасли, включая медицину, экологию, космонавтику, телекоммуникации [6, 7]. КМ позволяет создавать новые типы датчиков – квантовые датчики (КД), устройства, использующие квантовые явления для измерения физических величин, обнаруживающие и измеряющие эти величины с беспрецедентной точностью [6, 8]. КД и измерительные устройства значительно меньше и компактнее традиционных аналогов, они сочетают в себе малый размер и высокую точность, что позволяет интегрировать их в различные системы и устройства. КД менее подвержены влиянию ВВФ в части параметров электромагнитной совместимости, температурно-влажностных и механических величин, что повышает их надежность. КМ представляет собой перспективный раздел метрологии, опирающийся на возможности квантовой физики для решения задач по созданию эталонов и прецизионных СИ на основе стабильных квантовых явлений и фундаментальных физических констант (ФФК), обычно известных с высокой точностью [6, 7].

КМ базируется на взаимодействии электромагнитного излучения с атомными частицами. При этом используются такие эффекты и явления микромира, которые можно обнаружить на макроуровне. Для обнаружения таких явлений можно использовать связь между микро- и макроуровнями через безразмерные комбинации ФФК и масштабирование физических величин [6, 8]:

– безразмерные комбинации ФФК, такие как $\alpha = e^2 / (4\pi\epsilon_0\hbar c)$ (постоянная тонкой структуры), $G = F_{\text{grav}} / (ma^2)$ (гравитационная постоянная), и другие, позволяют установить связь между явлениями в микро- и макро- масштабах;

– масштабирование физических величин – используя размерный анализ и теорию подобия, можно связать величины на микро- и макроуровнях. Например, связь между размерами атома макроскопических объектов может быть установлена через отношение характерных длин, выраженных через ФФК.

Квантовые эффекты такие как сверхпроводимость, сверхтекучесть, квантование магнитного потока, могут проявляться на макроуровне. Рассмотрим связь между размером атома и размером макроскопического объекта, применяя теорию подобия [9, 10]. Идея теории заключается в установлении критериев подобия различных физических явлений и изучение с их помощью свойств самих явлений. Согласно теории подобия, физически подобными являются системы, у которых отношение характеризующих их сходственных величин есть постоянное число, называемое константой подобия. Характерный размер атома обозначим как a , а характерный размер макроскопического объекта как L .

Используя теорию подобия согласно [9, 10, 11], можем записать по формуле:

$$L = k * a, \quad (1)$$

где k – безразмерный коэффициент пропорциональности.

Выражаем a через ФФК, например, через борковский радиус атома водорода по формуле:

$$a = \hbar^2 / (me^2) = \hbar / (me\alpha), \quad (2)$$

где m – масса электрона, e – заряд электрона, α – постоянная тонкой структуры.

Подставляя это выражение в формулу (1) для L , получаем:

$$L = k * \hbar / (mc\sqrt{\alpha}). \quad (3)$$

Таким образом, мы можем связать размер микроскопического объекта L с фундаментальными физическими константами \hbar , m , e и α .

Аналогичные подходы можно применить и для других физических явлений, связывая их с ФФК через безразмерные комбинации и масштабирование.

Отметим некоторые новые измерительные задачи КМ [6, 7, 8, 12]:

- кардинальное снижение расходов на метрологическое обеспечение изделий ВВТ;
- повышение общего уровня измерительной техники и информационных технологий;
- необходимость создания российской электронно-компонентной базы (ЭКБ) (сверхбыстродействующие электронные компоненты);
- рост номенклатуры измеряемых величин и числа выполняемых функций;
- развитие передовых технологий при изготовлении СИ;
- требования к измерениям с ограниченным числом видов погрешностей без применения сложных методов коррекции;
- требования к увеличению производительности измерительных операций;
- требования к уменьшению зависимости от изменений внешних факторов;
- требования к уменьшению влияния человеческого фактора при постоянном увеличении конечных потребителей.

Основные преимущества применения КМ на производстве:

- повышение качества и точности продукции;
- улучшение контроля производственных процессов;
- повышение эффективности и производительности;
- возможность создания новых продуктов и технологий.

Квантовые эффекты, такие как суперпозиция (частица может существовать в нескольких состояниях одновременно) и запутанность, позволяют достигать беспрецедентной точности и чувствительности при измерениях. Это особенно важно для высокоточных приложений, таких как навигация, гравиметрия,

атомные часы и т.д. Ключевым понятием здесь является квантовая запутанность – явление, при котором состояния двух или более квантовых объектов оказываются взаимозависимыми, несмотря на их пространственное разделение. Концепция запутанности использовалась в квантовых вычислениях, криптографии и общении, и теперь она используется в КМ для повышения точности измерения [13]. Сила квантовой запутанности в этой области заключается в ее способности создавать корреляции между измерениями, которые можно использовать для повышения их точности. Например, атомные часы являются одними из самых точных устройств для хронометража, которые у нас есть, но с некоторыми ограничениями. Запутывание может быть использовано для преодоления этих ограничений путем создания корреляций между измерениями двух атомных часов. Запутывая атомы в часах, мы можем создать квантовое состояние, которое чувствительно к изменениям во времени, что позволит нам измерять время с более высокой точностью, чем позволяют классические методы [7, 14].

Математически квантовая запутанность описывается с помощью тензорного произведения состояний отдельных частиц [7, 14].

Пусть имеется квантовая система, состоящая из двух частиц A и B . Состояние этой системы можно записать в виде волновой функции по формуле:

$$|\psi\rangle = \sum c_{ij} |i\rangle_A \otimes |j\rangle_B, \quad (4)$$

где $|i\rangle_A$ и $|j\rangle_B$ – базисные состояния частиц A и B соответственно, а c_{ij} – комплексные коэффициенты.

Если система находится в запутанном состоянии, то состояния частиц A и B нельзя описать независимо друг от друга. Вместо этого необходимо рассматривать состояние всей системы.

Теперь предположим, что мы можем наблюдать квантовые шумы (флуктуации) объекта. Эти шумы будут отражать изменения в состоянии системы во времени. Используя принципы квантовой механики, можно показать, что по наблюдаемым шумам можно восстановить полное состояние системы $|\psi\rangle$.

Для этого необходимо провести измерения на одной из частиц (например, A) и проанализировать статистику этих измерений. Благодаря квантовой запутанности, состояние частицы B будет мгновенно проецироваться на соответствующее состояние, что позволит реконструировать всю волновую функцию $|\psi\rangle$ [7, 14].

Таким образом, наблюдая квантовые шумы объекта, в идеальном случае можно воссоздать его полное квантовое состояние, используя принципы квантовой механики и явление квантовой запутанности. Конечно, на практике существуют различные ограничения и источники погрешностей, но в теории данный подход является вполне обоснованным с точки зрения современной квантовой физики.

Квантовые СИ высокого метрологического уровня (встроенные системы контроля с большим объемом циркулирующей измерительной информации) должны позволять:

- интеграцию в глобальную информационную сеть;
- работу с большим объемом циркулирующей измерительной информации;
- осуществлять самоконтроль, самокалибровку и самодиагностику;
- измерять метрологические характеристики в требуемых диапазонах с высокой точностью и чувствительностью за счет преодоления стандартного квантового предела, использования свойств суперпозиции, запутанности, сжатия квантовых состояний;
- быть свободными от многих видов погрешностей измерений и не требовать применения сложных методов коррекции;
- наличие встроенных метрологических возможностей на стадии проектирования изделия, что позволит отойти от необходимости градуировки и периодической поверки СИ (т.е. отказ от понятия интервал между поверками и как следствие уход от традиционных эталонов) [15].

Решение таких задач необходимо осуществлять комплексно на законодательном, организационном, методическом и техническом направлениях [15].

Уникальность квантовых технологий заключается в их физической (природной) сущности, основанной на законах и явлениях квантовой механики (квантовых эффектах). КМ со стабильностью физических явлений и беспрецедентной точностью открывает возможности для измерений параметров, которые невозможно или сложно измерить традиционными методами (детектирование гравитационных волн, измерение магнитных полей с высокой чувствительностью и т.д.).

Таким образом, применение КМ позволит в дальнейшем преодолеть многие перечисленные выше ограничения традиционной метрологии с перспективой расширения и включения ее в раздел ТМ. Широкое внедрение квантовых измерительных систем

в различных областях промышленности и науки станет крупнейшим научно-техническим прорывом в области измерений, который обеспечит Российской Федерации технологическую независимость в соответствии со Стратегией национальной безопасности Российской Федерации [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. – М.: Наука, 1989. – С. 318.
2. Шредингер Э. Существуют ли квантовые скачки? // Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. – М.: Наука, 1976. – С. 261–284.
3. Де Бройль Л. Интерпретация волновой механики // Философские вопросы современной физики. – М.: Государственное издательство политической литературы, 1958. – С. 95.
4. Ландау Л., Лифшиц Е. Квантовая механика. – М.: Наука, 1989. – С. 14.
5. Эйнштейн А. Замечания к статьям // Собрание научных трудов. Т. 4. – М.: Наука, 1967.
6. Беданов Р.А. Квантовая физика и элементы квантовой механики: Учебник. «Учебное пособие: Для вузов. Специальная литература» – СПб.: «Лань» 2020. – С. 34–37.
7. Гуртовцев А.Л. Метрология цифровых измерений. – М.: Журнал «Современные технологии автоматизации (СТА)», № 1, 2008. – С. 66–74.
8. Ройтман М.С. Квантовая метрология. – М.: Журнал «Датчики и системы», №6, 2005. – С. 50–61.
9. Кирпичев М.В. Теория подобия. – М.: АН СССР, 1953.
10. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1977.
11. Cohen E.R., Taylor B.N., 1987, v. 59, h. 1121; Квантовая метрология и фундаментальные константы. Сборник статей, перевод с английского языка, М., 1981; – С. 76–98.
12. Кабатов В.В., Прокопишин В.Н. Квантовая метрология – перспективное направление развития отечественной метрологии. // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: VI Междунар. форум: сб. ст. / под ред. академика РАН В. В. Окрепилова. – СПб.: ГУАП, 2024. – С. 8–9.
13. Дойч Д., Экерт А. Введение в квантовые вычисления // Физика квантовой информации. – М.: Постмаркет, 2002. – С. 126–139.
14. Барагин И.В., Гришанин Б.А., Задков В.Н. Запутанные квантовые состояния атомных систем // Успехи физ. наук. – М., 2001. Т. 171, № 6. – С. 625–647.
15. Кузин А.Ю., Крошкин А.Н. Нормативно-правовые аспекты цифровой трансформации в метрологии. – М.: Журнал «Законодательная и прикладная метрология», № 5, 2022. – С. 14–21.
16. Указ Президента РФ от 2 июля 2021 г. № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» // М.: ООО «НПП «Гарант-Сервис», 2022.

ВОПРОСЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ ISSUES OF REMOTE TRANSMISSION OF MEASUREMENT INFORMATION FOR TESTING MODELS OF SHIPS AND VESSELS

*Кочугуров Н.Е., АО «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз»,
Целмс Р.Н., к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Скориантов Н.Н., к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,*

Руденкова Е.Г., к.п.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

*Kochugurov N.E., Almaz Central Marine Design Bureau JSC,
Tselms R. N., PhD, Tech., Associate Professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Skoriantov N.N., PhD, Tech., Associate Professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation;
Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation*

E-mail: Kochugurov.spb@gmail.com; tel. +7(812) 373-28-00

skoriantov_nn@mail.ru; tel. +7(812) 494-70-75

tselms_rn@pochta.tvoe.tv; tel. +7(812) 494-70-75

e-mail: l654007@yandex.ru, tel. 8(985) 923-70-72

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы дистанционной передачи измерительной информации для испытаний моделей кораблей и судов, а также представлен способ обработки данных, полученных в результате проведения испытаний моделей кораблей и судов на открытом водоёме.

Annotation: The article discusses the issues of remote transmission of measurement information for testing models of ships and vessels, and also presents a method for processing data obtained as a result of testing models of ships and vessels in an open reservoir.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение; измерительный комплекс, способ обработки данных; передача информации; средства измерений.

Keywords: metrological support; measuring complex, data processing method; information transmission; measuring instruments.

Введение

С целью повышения качества проектируемых кораблей и судов для документального подтверждения требований заказчика создаваемых образцов вооружения, военной и специальной техники (далее – ВВСТ) проводятся натурные испытания моделей кораблей и судов на открытом водоёме. При своевременной и оперативной верификации и анализе исходных и экспериментальных данных, полученных в ходе натурных испытаний образцов ВВСТ, существенно повышается эффективность проектирования заказов предприятия судостроительной промышленности.

При проведении испытаний беспилотных моделей кораблей и судов (БМ) на открытых водоёмах, дистанционная передача экспериментальных данных позволяет исключить использование кабелей. В свою очередь при дистанционной передаче (получении) информации снижается влияние электромагнитных помех, что несомненно оказывает существенное влияние, в том числе, на качество получаемой (передаваемой) измерительной информации. Благодаря дистанционной передаче

экспериментальной информации появляется возможность проведения испытания образцов ВВСТ на большем расстоянии от оператора, что в свою очередь позволяет работать автономно, т.е. без использования катера-буксировщика.



Испытания беспилотной модели с измерительным комплексом

Основная часть

Для определения характерных особенностей поведения модели корабля или судна, в том числе характеристик управляемости и мореходности, при испытаниях на открытой воде для измерения параметров движения самоходных и буксируемых

моделей применяются адаптированные измерительные комплексы (далее – АИК).

Для АИК, входящих в состав более сложных образцов ВВСТ, следует учитывать требования комплекса стандартов и нормативных документов на автоматизированные системы: ГОСТ 34.201, ГОСТ 34.601, ГОСТ 34.602 и другие документы этого комплекса, а также нормативные документы и эксплуатационная документация по областям применения этих образцов.

Достоверность полученной измерительной информации с помощью АИК подтверждается благодаря осуществлению метрологического обеспечения путём проведения, в том числе, плановой поверки и калибровки средств измерений (далее – СИ), входящих в состав измерительных комплексов. Также осуществляется тарировка СИ при помощи поверенных приборов для настройки и установки поправочных коэффициентов.

Полученные значения и их метрологические характеристики в результате проведения испытаний обрабатываются, верифицируются и передаются для дальнейшего анализа инженерам и специалистам по проектированию кораблей и судов.

Метрологическое обеспечение АИК включает в себя следующие виды деятельности:

- нормирование, расчёт метрологических характеристик измерительных каналов АИК;
- метрологическая экспертиза технической документации на АИК;
- испытания АИК с целью утверждения типа;
- утверждение типа АИК и испытания на соответствие утверждённому типу;
- сертификация АИК;
- поверка и калибровка СИ и АИК;
- метрологический надзор за выпуском, монтажом, наладкой, состоянием и применением АИК.

Нормирование метрологических характеристик АИК является одним из основных элементов системы метрологического обеспечения на этапе проектирования.

Метрологические характеристики АИК должны нормироваться для каждого измерительного канала (далее – ИК), входящего в состав АИК.

Для ИК АИК (в том числе для измерительных каналов различных типов АИК или более сложных структур, для которых утверждён тип такого измерительного канала без указания наименования конкретного АИК) изготовитель, как правило, устанавливает нормы на метрологические характеристики измерительных каналов в целом в соответствии с ГОСТ 8.009–84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» и с учетом МИ 2439–97 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологические характеристики измерительных систем. Номенклатура. Принципы регламентации, определения и контроля».

Нормированные метрологические характеристики ИК должны обеспечивать:

- расчёт характеристик погрешности измерений, выполняемых посредством ИК в рабочих условиях эксплуатации;
- контроль при испытаниях и поверке АИК на соответствие нормированным метрологическим характеристикам ИК АИК.

Суммарная погрешность СИ (ΣD) в реальных условиях эксплуатации рассчитывалась по формуле:

$$\Sigma D = 1,1 \sqrt{D_o^2 + (V/2)^2 + \Delta i^2},$$

где: 1,1 – коэффициент при значении доверительной вероятности $P = 0,95$ в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 и Р 50.2.038–2004,

D_o – основная погрешность СИ по техническим условиям (ТУ),

V – вариация показаний СИ по ТУ,

Δi – дополнительная погрешность СИ в реальных условиях эксплуатации по ТУ.

Перечень измеряемых параметров и их нормы точности, при испытании БМ приведён в Таблице 1.

Измерительные датчики в составе БИНС БМ приведены в Таблице 2.

Таблица 1

№ п.п.	Наименование параметра	Диапазон измерения	Норма точности	Минимальная частота опроса датчиков, Гц
1	Угол крена	от минус 40° до плюс 40°	$\pm 0,17^\circ$	10
2	Угол дифферента	от минус 10° до плюс 10°	$\pm 0,17^\circ$	10

№ п.п.	Наименование параметра	Диапазон измерения	Норма точности	Минимальная частота опроса датчиков, Гц
3	Угловая скорость дифферента	от минус 18 °/с до плюс 18 °/с	± 0,54 °/с	10
4	Угловая скорость крена	от минус 18 °/с до плюс 18 °/с	± 0,54 °/с	10
5	Угловая скорость рыскания	от минус 18 °/с до плюс 18 °/с	± 0,54 °/с	10
6	Вертикальное ускорение в центре масс	от минус 30 м/с ² до плюс 30 м/с ²	± 1,2 м/с ²	10
7	Поперечное ускорение	от минус 20 м/с ² до плюс 20 м/с ²	± 0,8 м/с ²	10
8	Продольное ускорение	от минус 20 м/с ² до плюс 20 м/с ²	± 0,8 м/с ²	10
9	Соппротивление	до 1000 Н	± 5 Н	10
10	Средняя скорость движения по GPS, м/с	от 0° до 90° с.ш.	0,1 м/с	1
11	Вертикальное ускорение в носу и корме модели	от минус 30 м/с ² до плюс 30 м/с ²	± 1,2 м/с ²	10

Таблица 2

Наименование датчика	Назначение датчика	Погрешность	Эталон
Датчики угловых скоростей 03–02S № 1	Измерение угла рыскания ψ	± 0,3 °/с	Государственный вторичный эталон
Датчики угловых скоростей 03–02S № 2	Измерение угла килевой качки θ	± 0,3 °/с	Государственный вторичный эталон
Датчики угловых скоростей 03–02S № 3	Измерение угла бортовой качки ϕ	± 0,3 °/с	Государственный вторичный эталон
Акселерометр BC201 № 1	Измерение величины продольного ускорения	± 0,04 м/с ²	Рабочий эталон 2-го разряда
Акселерометр BC201 № 2	Измерение величины поперечного ускорения	± 0,04 м/с ²	Рабочий эталон 2-го разряда
Акселерометр BC202	Измерение величины вертикального ускорения	± 0,1 м/с ²	Первичный эталон ГЭТ 94–01
Двухосевой инклинометр Posital Fraba ACS-040–2	Измерение угла дифферента и крена (в статике)	± 0,08°	Рабочий эталон 2-го разряда

При разработке АИК с дистанционной передачей данных должны быть решены следующие задачи:

- обеспечение сбора экспериментальных данных;
- представление и первичная обработка экспериментальных данных.

Для осуществления дистанционной передачи данных могут быть использованы:

- радиомодемы;
- Wi-fi передатчики.

Беспроводные системы передачи данных – это устройства передачи данных по радиоканалу. Радиомодемы имеют значительно больший максимальный радиус передачи, чем по кабелю, но небольшую скорость передачи данных. При условиях прямой видимости и малого объема данных радиомодем может передавать данные на дистанцию до

500 м. Радиомодемы предназначены для создания распределенных беспроводных сетей. С помощью запрограммированных протоколов организуется связь между оборудованием с интерфейсами, например: RS422 и (или) RS485.

Wi-fi передатчики имеют большую пропускную способность по сравнению с радиомодемами и могут быть использованы для передачи большого объема измерительной информации (экспериментальных данных). Также, с помощью Wi-fi можно организовать локальную сеть, соединяющую модель и береговой компьютер. В случае, если связь по какой-либо причине будет утрачена на непродолжительное время, запись всей измерительной информации будет дублироваться на Flash-накопитель, установленный на борту модели судна.

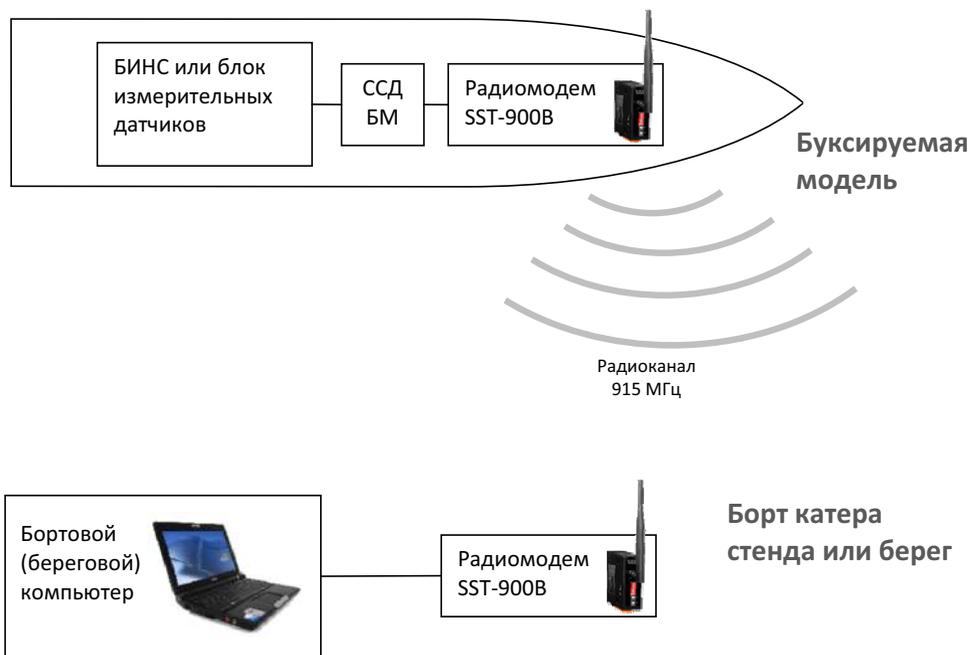


Рисунок 1 – Пример расположения оборудования.

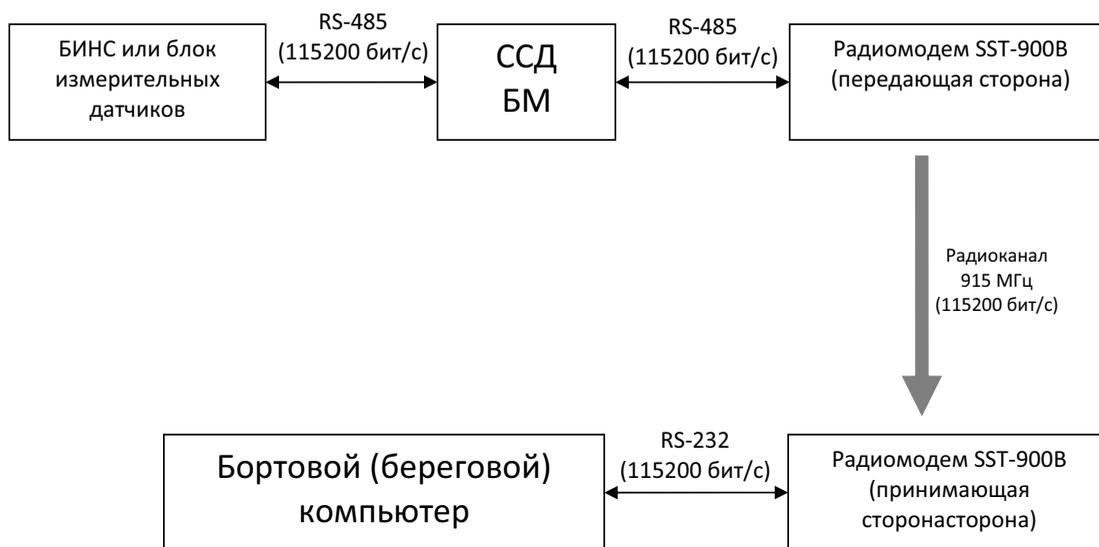


Рисунок 2 – Пример структурной схемы расположения.

Основной задачей АИК с дистанционной передачей данных является передача получаемой информации от испытываемой модели судна на компьютер оператора (бортовой ли береговой компьютер).

- Радиомодемы позволяют передать до 25 пакетов с данными в секунду.
- В каждом пакете содержатся данные от 12 измерительных датчиков.

Скорость передачи данных и удобство использования радиомодемов на испытательной станции отвечают всем поставленным задачам измерения.

Для защиты достоверности данных, несанкционированной настройки или вмешательства в программное обеспечение (далее – ПО) обеспечивается постоянный надзор и автоматическая проверка контрольной суммы.

После проведения валидации и верификации адаптированный измерительный комплекс с дистанционной передачей данных подлежит аттестации, в том числе входящие в его состав система сбора данных (ядра) и его ПО.

№ байта	Данные								
0–7	Заголовок пакета данных "BINSBMn#".								
	Байт	0	1	2	3	4	5	6	7
	Значение	B	I	N	S	B	M	n	#
	n – номер БИНС БМ ('1', '2' или '3').								
8–11	Системное время, измеряемое в миллисекундах. Тип переменной: UInt32.								
12–13	Выходной сигнал с датчика угловой скорости w								
14–15	Выходной сигнал с датчика угловой скорости w								
16–17	Выходной сигнал с датчика угловой скорости w								
18–19	Выходной сигнал с акселерометра ax (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.								
20–21	Выходной сигнал с акселерометра ay (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.								
22–23	Выходной сигнал с акселерометра az (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.								
24–25	Контрольная сумма байтов с 8 по 23.								
26–27	Выходной сигнал с акселерометра az1 (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.								
28–29	Выходной сигнал с акселерометра az2 (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.								
30–31	Выходной сигнал с инклинометра дифферента (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.								
32–33	Выходной сигнал с инклинометра крена (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.								
34–35	Выходной сигнал с датчика силы №1 (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.								
36–37	Выходной сигнал с датчика силы №2 (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.								
38–39	Контрольная сумма байтов с 38 по 39.								

Рисунок 3 – Пример формата данных БИНС БМ 1/2/3.

Заключение

Применяемый при проведении натурных испытаний моделей судов и кораблей различного типа и назначения адаптированный измерительный комплекс с дистанционной передачей данных от испытываемой модели на компьютер оператора (бортовой или береговой компьютер) позволит расширить возможности проведения измерений и разработать перспективную концепцию новых типов испытаний для образцов ВВСТ:

- испытания моделей судов на воздушной подушке на полигоне, как на воде, так и на твёрдой поверхности;
- испытания беспилотных образцов ВВСТ, в том числе радиоуправляемых моделей судов;
- испытания моделей судов при помощи буксирования тросом в определённой акватории без применения кабелей.

Новые возможности проведения измерений в перспективе позволят определять основные и экс-

плуатационные характеристики будущего судна или корабля в реальных условиях работы.

Список литературы

1. Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении. СПб.: Судостроение, 2001. 264 с.
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высш. школа, 1982. 231 с.
3. Мишура Т.П., Скориантов Н.Н. Метрологическое обеспечение диагностических комплексов для оценки технического состояния энергетического оборудования // Датчики и Системы. 2016. № 1. С. 63–68.
4. Скориантов Н.Н., Целмс Р.Н., Грабарь А.Г. Метрологическое обеспечение методов обработки и анализа данных в интеллектуальных информационно-измерительных системах. Учебное пособие. – СПб.: ГУАП, 2019. – 52с.
5. ГОСТ 8.009–84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».
6. ГОСТ 20911–89. «Техническая диагностика. Основные термины и определения».

**ОЦЕНИВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОСТАТОЧНОГО ФОНА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО
ПОЛИГОНА ЗАКРЫТОГО ТИПА**
**EVALUATION OF THE CLOSED-TYPE ELECTRODYNAMIC TEST SITE
RESIDUAL BACKGROUND CHARACTERISTICS**

*Галеницкий А.В., к.т.н., Самородов Б.А.,
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского*
Galenitsky A.V., k.t.s., Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky
Samorodov B.A., Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky
E-mail: vka@mil.ru; tel. тел.: +7 (812) 237-10-21

Аннотация: Рассмотрен вопрос реализации оценивания среднего уровня остаточного фона электродинамического полигона закрытого типа, предназначенного для измерения поляризационных матриц рассеяния объектов. Указанная техническая характеристика необходима для оценивания метрологических характеристик современных лабораторных радиолокационных поляриметров. Реализация оценивания характеристики построена на базе математической модели радиолокационного канала многочастотных измерений поляризационной матрицы рассеяния, и опробована в ходе испытаний по утверждению типа реального средства измерения.

Annotation: The article considers the issue of estimating the average residual background level of the closed-type electrodynamic test site designed to measure the objects polarization scattering matrices. This technical characteristic is necessary for evaluating the metrological characteristics of modern laboratory radar polarimeters. The implementation of the characteristic evaluation is based on a radar channel of polarization scattering matrix multi-frequency measurements mathematical model, and tested during tests to approve the type of real measuring instrument.

Ключевые слова: электродинамический полигон, поляризационная матрица рассеяния, средний уровень остаточного фона, погрешность измерения ЭПР, минимальная измеряемая ЭПР.

Keywords: electrodynamic test site, polarization scattering matrix, average residual background level, RCS measurement error, minimum measurable RCS.

Введение

В последние десятилетия в мире сформировался «золотой стандарт» метода измерения радиолокационных характеристик (РЛХ) объектов, основанный на многочастотных измерениях комплексного коэффициента отражения в ортогональном антенном базисе, реализуемый в условиях электродинамических полигонов (ЭДП) закрытого типа. Такой ЭДП представляет собой взаимосвязанную систему, включающую помещение (сооружение) с радиопоглощающим покрытием, систему полеобразования включающую в себя коллиматор с комплектом поляризованных антенн-облучателей, перекрывающих требуемый частотный диапазон, устройство высокоточного позиционирования объекта испытаний в рабочей зоне ЭДП, многочастотный измеритель коэффициента отражения/передачи (как правило, векторный анализатор цепей), вычислительную систему управления комплексом и обработки результатов измерений, а также ряд других вспомогательных элементов [1]. Уровень современных технологий, в целом,

по механическим характеристикам устройств позиционирования объектов испытаний, точностным характеристикам измерения коэффициентов отражения/передачи электрических цепей, характеристикам полеобразующих систем, определяющих выполнение условий дальней зоны, а также характеристикам быстродействия и функциональности используемых вычислительных средств и программного обеспечения. В России можно считать сложившейся практикой сертификации ЭДП как средств измерений, на что указывает появление комплекса военных эталонов единиц эффективной площади рассеяния (ЭПР) и коэффициента усиления антенн КВЭ-61 [2]. При этом система взглядов экспертного сообщества на методы первичной обработки данных прямых измерений коэффициентов отражения/передачи, реализованные в метрологически значимой части программно-методического обеспечения процесса получения элементов поляризационной матрицы (ПМ) рассеяния объектов, радиотехнических (в том числе поляризационных) характеристик антенн и метрологических характеристик поля-

риметрических ЭДП, продолжает формироваться. Требуют решения отдельные задачи нормирования погрешностей измерения.

Так, для решения задачи определения погрешности измерений ЭПР используется стандартизованный [3] метод вычисления границ неисключённой систематической погрешности (НСП), предполагающий суммирование статистически независимых частных разнородных НСП. Сложившаяся в последнее десятилетие практика проведения испытаний РИК в целях утверждения типа средства измерений позволяет перечислить 6 НСП (в скобках указаны типовые значения для ЭДП закрытого типа с непрерывным зондирующим сигналом):

- погрешность определения действительного значения ЭПР эталона (0,12);
- инструментальная погрешность измерений комплексного коэффициента отражения/передачи (0,05...0,1);
- неравномерность поля зондирующей волны в рабочей зоне (0,3...0,7);
- погрешность, обусловленная неидеальной поляризационной развязкой системы «облучатель-коллиматор» (0,001...0,04);
- погрешность, обусловленная влиянием среднего уровня остаточного фона ($10^{-4}...10^{-3}$);
- погрешность, обусловленная влиянием неучтенных факторов (0,023).

Как видно, НСП, обусловленная влиянием среднего уровня остаточного фона, имеет наименьший порядок величины, и, следовательно, в наименьшей степени влияет на результат вычисления погрешности измерения ЭПР. Однако, физический смысл этой НСП состоит в том, что она задаёт нижнюю границу динамического диапазона РЛК, т.е. нижний предел измеряемых на данном ЭДП значений ЭПР. Для определения чувствительности РЛК, т.е. минимальной измеряемой ЭПР, ис-

пользуется отношение сигнал/помеха, принимаемое равным не менее 10, причем средний уровень остаточного фона РЛК задаёт в этом отношении значение ЭПР пассивной помехи. Следовательно, увеличив вышеприведенное типовое значение среднего уровня остаточного фона в 10 раз, минимальная измеряемая ЭПР может составить 10^{-2} м². Из этого следует серьёзное противоречие, поскольку ЭПР такого порядка имеет, например, проводящая сфера диаметром 11 см. ЭДП закрытого типа с такой чувствительностью создавать и использовать для измерения РЛХ бессмысленно. Кроме этого, приведенная оценка ($10^{-4}...10^{-3}$) НСП, обусловленной влиянием среднего уровня остаточного фона, при измерениях на кросс-поляризации, отличается в меньшую сторону, причём разница может доходить до 1 порядка. Это объясняется величиной поляризационной развязки РЛК (10^{-2} и меньше) и ставит вопрос о том, как именно оценивать данную НСП в режиме полного поляризационного приёма.

В данной работе обоснован способ оценивания среднего уровня остаточного фона, который получен в ходе проведения испытаний по утверждению типа средства измерения поляриметрического радиолокационного измерительного комплекса (РИК) «Цунами-4» и учитывает вышеприведенные особенности.

Математическое описание задачи оценивания характеристик остаточного фона электродинамического полигона закрытого типа

В основе рассмотрения процессов, протекающих в радиолокационном канале (РЛК) измерения ПМ, в условиях ЭДП закрытого типа, лежит модель радиолокационного канала [4]. На рисунке 1 представлен его граф, на котором схематично показаны все комплексные характеристики передачи канала, формирующие результат измерений.

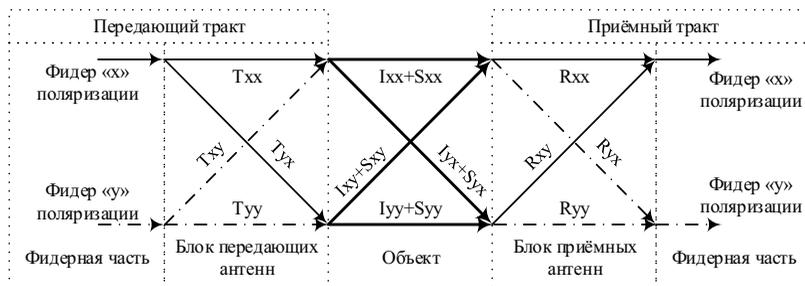


Рисунок 1 – Граф радиолокационного канала электродинамического полигона закрытого типа

Результат измерений определяется уравнением РЛК ЭДП:

$$\dot{\mathbf{e}}^r = \dot{\mathbf{R}}\{(\dot{\mathbf{S}} + \dot{\mathbf{I}})\dot{\mathbf{T}}\dot{\mathbf{e}}_i^t\} + \dot{\mathbf{N}}, \quad (1)$$

где: $\dot{\mathbf{e}}^r = [\dot{e}_x^r(\omega) \quad \dot{e}_y^r(\omega)]^T$ – комплексный вектор-функция, описывающий спектры ортогонально поляризованных составляющих поля, наблюдаемые на выходе приёмных трактов измерительной установки, x, y – индексы ортов \vec{x}, \vec{y} , задающих ортогональный поляризационный антенный базис измерительной установки, ω – круговая частота, «Т» – символ операции транспонирования;

\dot{e}_i^t – вектор-функция, описывающий спектры ортогональных составляющих поля, излучаемого в направлении объекта, антенной с поляризацией $i=x, y$. При этом в линейном базисе $\dot{e}_x^t = [\dot{e}^t(\omega) \quad 0]^T$, $\dot{e}_y^t = [0 \quad \dot{e}^t(\omega)]^T$. Размерность 2×1 векторов $\dot{\mathbf{e}}^r$ и \dot{e}_i^t соответствует выполнению условий дальней зоны.

$\dot{\mathbf{T}}$ – матрица-функция, содержащая передаточные амплитудно-фазочастотные характеристики (АФЧХ) передающих трактов РЛК;

$\dot{\mathbf{R}}$ – матрица-функция, содержащая передаточные АФЧХ приёмных трактов РЛК;

$\dot{\mathbf{S}}$ – матрица-функция, содержащая передаточные АФЧХ наблюдаемого объекта – искомая ПМ рассеяния цели,

$\dot{\mathbf{I}}$ – матрица-функция, содержащая передаточные АФЧХ источников пассивных помех. Применительно к поляриметрическому ЭДП $\dot{\mathbf{I}}$ является ПМ рассеяния фона, которая может быть представлена суперпозицией матриц рассеяния отдельных источников пассивной помехи, при условии их пренебрежимо малого электромагнитного взаимодействия:

$$\dot{\mathbf{I}} = \sum_{i=1}^N \dot{\mathbf{I}}_i, \quad (2)$$

где $i=1 \dots N$ – условный номер источника пассивной помехи в РЛК ЭДП;

$\dot{\mathbf{N}}$ – шумовой вектор-функция.

Отметим, что матрицы-функции $\dot{\mathbf{T}}$ и $\dot{\mathbf{R}}$ включают в себя передаточные характеристики как антенно-фидерных трактов, так и трактов распространения электромагнитного излучения в помехи ЭДП.

Приведенный на рисунке 1 граф подразумевает использование системы полеобразования ЭДП с облучателями типа «четверённая сборка», показанного на рисунке 2. Все облучатели в данном устройстве одинаковы, при этом два из них сориентированы относительно двух остальных так, чтобы плоскости их линейных поляризаций были ортогональны. Два передающих ортогонально поляризованных облучателя устройства работают попеременно, а два приёмных, также ортогонально поляризованных, работают постоянно, реализуя полный поляризационный приём в линейном базисе. Преимуществом такого антенного блока является простота облучателей с полосой пропускания, перекрывающей диапазон частот стандартного прямоугольного волновода [5]. Это позволяет масштабировать электродинамические модели облучателей на этапе их изготовления для получения нужного частотного диапазона, и, комплектом из семи четверённых сборок полностью перекрыть диапазон частот 2,6...40 ГГц.

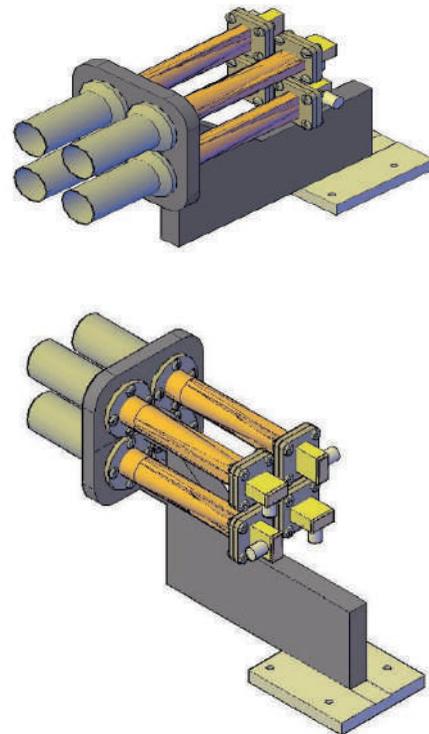


Рисунок 2 – Эскизы облучающего устройства системы полеобразования типа «четверённая сборка»

Для оценивания матриц-функций $\dot{\mathbf{S}}$ и $\dot{\mathbf{I}}$, согласно уравнению РЛК (1), прямо-передающий

тракт работает в режиме измерения комплексного коэффициента передачи (ККП). Для этого используется векторный анализатор цепей (ВАЦ) с рабочей полосой нужного частотного диапазона и 4-мя приёмо-передающими портами, которые соединяются с блоком облучателей. Коммутация блока облучателей, на примере РИК «Цунами-4», может быть реализована следующим образом. Пусть на передачу работают порты ВАЦ № 1 и № 3, а на приём порты № 2 и № 4. Тогда реализация измерений компонент ПМ ККП в линейном ортогональном базисе реализуется путём измерения s-параметров согласно таблице 1.

Таблица 1

Вариант коммутации портов ВАЦ и антенного блока при измерениях ПМ в линейном ортогональном поляризованном базисе

№ п/п	№ порта ВАЦ		Обозначение	
	на передачу	на приём	измеряемого s-параметра	компоненты поляризационной матрицы
1	1	2	s_{21}	VV
2	1	4	s_{41}	HV
3	3	2	s_{23}	VH
4	3	4	s_{43}	HH

Перечисленные s-параметры составляют ПМ ККП фона \dot{I} при отсутствии объекта испытаний в рабочей зоне ЭДП, или сумму ПМ ККП фона \dot{I} и объекта \dot{S} при размещении объекта испытаний в рабочей зоне ЭДП. В первом случае результат измерений может быть представлен в виде уравнения:

$$\dot{M}_I = \dot{R}\dot{T} + \dot{N}, \quad (3)$$

где: \dot{M}_I – поляризационная матрица ККП фона РЛК ЭДП;

\dot{N} – поляризационная матрица аддитивного шума РЛК ЭДП.

Во втором случае результат измерений, при допущении об отсутствии электромагнитного взаимодействия объекта испытаний с источниками фона, может быть представлен в виде уравнения:

$$\dot{M}_{I+S} = \dot{R}\dot{S}\dot{T} + \dot{R}\dot{T} + \dot{N}. \quad (4)$$

Элементы ПМ ККП \dot{M}_I и \dot{M}_{I+S} в обоих уравнениях определяются путём вычисления отношений уровней и разностей фаз зондирующего \dot{e}^t и принимаемых \dot{e}_i^r (в приёмных трактах x и y поляризации) монохроматических сигналов. Указанные вычисления реализуются ВАЦ аппаратно с нормированными погрешностями [6]. С учётом обозначений, введённых в уравнении (1) и таблице 1, значения s-параметров, соответствующих компонентам измеряемой ПМ ККП (3) и/или (4) в линейном ортогональном базисе, вычисляются ВАЦ следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{21}(\omega) &= \dot{m}_{vv}(\omega) = \frac{\dot{e}_{vv}^r(\omega)}{\dot{e}^t(\omega)}, & \dot{s}_{23}(\omega) &= \frac{\dot{e}_{vh}^r(\omega)}{\dot{e}^t(\omega)} = \dot{m}_{vh}(\omega), \\ \dot{s}_{41}(\omega) &= \dot{m}_{hv}(\omega) = \frac{\dot{e}_{hv}^r(\omega)}{\dot{e}^t(\omega)}, & \dot{s}_{43}(\omega) &= \frac{\dot{e}_{hh}^r(\omega)}{\dot{e}^t(\omega)} = \dot{m}_{hh}(\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнений (3) и (4) ясно, что в целях уменьшения отношения «сигнал/помеха» в результатах измерений (5) абсолютные значения компонент матрицы-функции \dot{M}_I желательно минимизировать, например, увеличением волновых размеров помещения ЭДП и оптимизацией электродинамических характеристик устройства позиционирования объекта испытаний в рабочей зоне. Однако, в настоящее время не существует технических путей обратить матрицу \dot{M}_I в нулевую матрицу на этапе прямых измерений, так как для этого, при измерении ПМ ККП объекта, требуется реализовать его позиционирование относительно линии визирования с контролируемой погрешностью в условиях свободного пространства, что недостижимо. Также очевидно, что разность уравнений (4) и (3) позволяет получить ПМ ККП объекта испытаний \dot{M}_S . Переход от ПМ ККП объекта испытаний \dot{M}_S к его искомой ПМ \dot{S} осуществляется путём решения задачи:

$$\dot{S} = \dot{C}^{-1}\dot{M}_S, \quad (6)$$

где \dot{C}^{-1} – обратная матрица-функция ККП РЛК ЭДП, состоящая из произведений матриц-функций \dot{T} и \dot{R} . Структура данной матрицы включает в себя АФЧХ передачи и поляризационной развязки РЛК ЭДП [4], которые

вычисляются по специальным алгоритмам в ходе совместной обработки результатов калибровочных измерений ПМ ККП \dot{M}_S и известных с нормированными погрешностями ПМ \dot{S} применительно к набору радиолокационных калибровочных отражателей (КО) [7]. Также отметим, что в уравнении (6) \dot{C}^{-1} – является матрицей размерности 4×4 , а \dot{S} и \dot{M}_S – записаны в виде векторов размерности 4×1 (векторы рассеяния). Элементы векторов и матрицы – комплексные функции частоты.

Остаточный фон ЭДП обусловлен изменчивостью фоновой обстановки на интервале времени, что является одним из факторов, влияющих на погрешность измерений ПМ объекта \dot{S} . Он проявляется в разности ПМ ККП фона, измеренных на некотором временном интервале:

$$\dot{M}_{\Delta I} = \dot{M}_{I1} - \dot{M}_{I2}, \quad (7)$$

где: \dot{M}_{I1} и \dot{M}_{I2} – две реализации ПМ фона, измеренные в разное время, как правило, в начале и по завершении измерительного цикла. Уравнения (6) и (7) позволяют найти ПМ остаточного фона. Так, в предположении постоянства матрицы-функции \dot{C}^{-1} на интервале выполнения операций измерительного цикла, ПМ остаточного фона может быть оценена следующим образом:

$$\dot{S}_{\Delta I} = \dot{C}^{-1} \dot{M}_{\Delta I}. \quad (8)$$

Данный способ оценивания применим для ЭДП закрытого типа, в которых тепловые деформации приёмо-передающих трактов незначительны, например короткофокусные маломощные РИК. Если же тепловые деформации приёмо-передающих трактов ЭДП существенны, например, они содержат мощные усилительные элементы, ПМ остаточного фона корректно оценивать согласно уравнению:

$$\dot{S}_{\Delta I} = \dot{S}_{I1} - \dot{S}_{I2} = \dot{C}_1^{-1} \dot{M}_{I1} - \dot{C}_2^{-1} \dot{M}_{I2}, \quad (9)$$

где: \dot{S}_{I1} и \dot{S}_{I2} – реализации ПМ фона, полученные по данным измерений \dot{M}_{I1} и \dot{M}_{I2} , выполненных в начале и по завершении измерительного цикла;

\dot{C}_1^{-1} и \dot{C}_2^{-1} – реализации обратной матрицы-функции ККП РЛК ЭДП, вычисленные по данным цикла калибровочных измерений в начале и по завершении измерительного цикла.

Практическая реализация процедуры оценивания остаточного фона в ЭДП закрытого типа на примере РИК «Цунами-4»

Цикл измерений РЛХ объекта испытаний включает в себя последовательное измерение ПМ ККП (3) и (4), соответственно, фона и КО в условиях фона. Типовая последовательность измерений для РИК «Цунами-4» приведена в таблице 2. Все измерения ПМ ККП, перечисленные в таблице, являются многоракурсными, т.е. с последовательным позиционированием опорного приспособления или отражателя, закреплённого на нём под заданным ракурсом относительно линии визирования. Это необходимо как для поиска в результатах измерений нужного лепестка диаграммы обратного рассеяния КО, так и для наиболее полного вычитания фона.

Смысл неоднократных измерений ПМ ККП фона \dot{M}_I состоит в том, что опорные приспособления для позиционирования разных КО и объекта отличаются. При этом, имеет место электромагнитное взаимодействие опорного приспособления и объекта измерений, что приводит к наличию соответствующей НСП в оценке ПМ \dot{S} как объекта, так и любого из КО.

По данным таблицы (2) видно, что калибровочные измерения (пп.1–10) занимают около 1 часа, а измерения ПМ ККП объекта (пп.11–13) – около 5 часов. Эти интервалы времени могут меняться в зависимости от полосы частот зондирования и шага позиционирования объекта по ракурсу. Такая последовательность измерений позволяет выполнить оценку остаточного фона как в соответствии с уравнением (8), так и в соответствии с уравнением (9), причём никаких специальных измерений для этого не требуется.

На примере измерений в РИК «Цунами-4» рассмотрим структуру ПМ ККП \dot{M}_{I+S} , представленную для наглядности в виде дальностных портретов на рисунке 3.

Типовая последовательность измерений ПМ ККП при реализации измерительного цикла ПМ объекта испытаний

№ п/п	Время записи файла данных ПМ ККП	Измеряемая ПМ ККП	Радиолокационный отражатель
1.	10:08	\dot{M}_I	фон для КО №№ 1–4
2.	10:17	\dot{M}_{I+S}	КО №1 в условиях фона
3.	10:27	\dot{M}_{I+S}	КО №2 в условиях фона
4.	10:37	\dot{M}_{I+S}	КО №3 в условиях фона
5.	10:47	\dot{M}_{I+S}	КО №4 в условиях фона
6.	10:56	\dot{M}_I	фон для КО №№ 1–4
7.	11:04	\dot{M}_I	фон для КО №№ 5–6
8.	11:08	\dot{M}_{I+S}	КО №5 в условиях фона
9.	11:12	\dot{M}_{I+S}	КО №6 в условиях фона
10.	11:16	\dot{M}_I	фон для КО №№ 5–6
11.	11:28	\dot{M}_I	фон для объекта испытаний
12.	13:02	\dot{M}_{I+S}	объект испытаний в условиях фона
13.	16:37	\dot{M}_I	фон для объекта испытаний
14.	18:16 – 19:21	Повтор калибровочных измерений по пп. 1–10	
15.	-	Обработка результатов измерений	

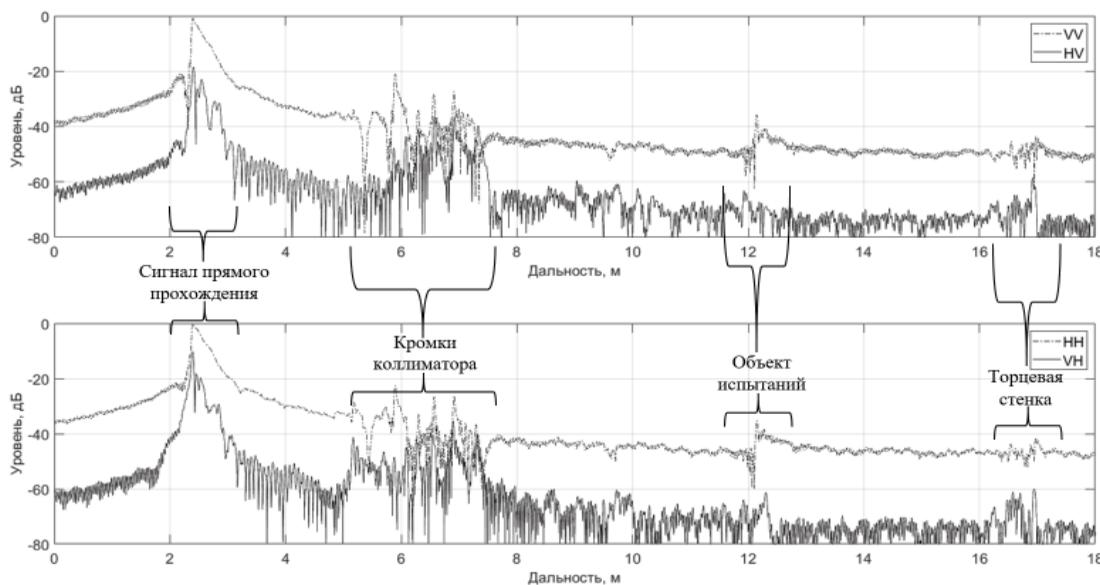


Рисунок 3 – Дальностные портреты фона РЛК в присутствии объекта испытаний

Интерпретация приведенных зависимостей более наглядна при рассмотрении фото коллиматорного зала РИК на рисунке 4. Как видно на графиках, ис-

точники фона формируют достаточно сложную интерференционную картину, однако, согласно уравнению (2), являются независимыми рассеивателями.

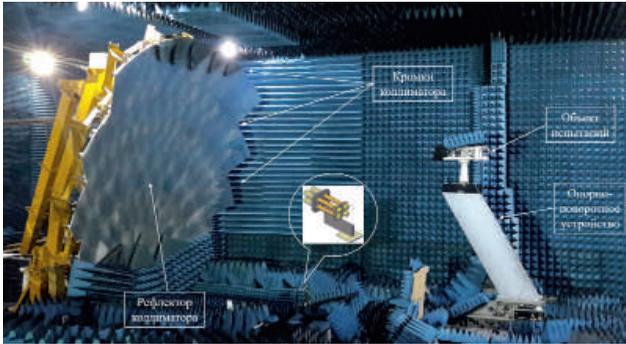


Рисунок 4 – Фото коллиматорного зала РИК «Цунами-4»

Путь распространения зондирующего излучения совпадает со шкалой дальности на рисунке 3. Зондирование осуществлялось в полосе частот 9–11 ГГц с шагом 5 МГц, измерялись *s*-параметры, приведенные в таблице 1. Переход от измеренных АФЧХ к дальностным портретам осуществлялся с использованием обратного преобразования Фурье. На дальностях 2–3 м приведенных зависимостей наблюдается сигнал прямого прохождения зондирующего излучения из излучающей антенны в приёмные. Это наиболее мощный источник фона, поскольку электрический путь зондирующего излучения от генератора в приёмный тракт является кратчайшим, т.е. подвержен наименьшему затуханию. К его пиковому значению на согласованной компоненте «НН» ПМ ККП нормированы остальные дальностные портреты. На дальностях 5–7.5 м видны отражения от кромок коллиматора, положения по дальности которых могут быть поставлены в соответствие конкретным краям вырезки параболоида по фото на рисунке 4. Далее, на дальностях около 12 м находится рабочий объем РИК, где расположен калибровочный отражатель на опорно-поворотном устройстве. На дальности около 17 м расположена торцевая стенка коллиматорного зала, которая находится напротив коллиматора (не видна на рисунке 4). Отметим, что уровень дальностных портретов на кросс-поляризационных компонентах, в целом, соответствует поляризационной развязке облучателей этого типа – порядка 20 дБ.

Аналогичным образом на рисунке 5 представлены ДП разности двух фоновых реализаций $\dot{M}'_{\Delta I}$, измеренных с интервалом 2 часа. Практика измерений показывает, что время между измерениями фона на уровень разности $\dot{M}'_{\Delta I}$ существенно не влияет.

Зависимости на рисунке 5 показывают, что участки превышения уровня ДП на согласованных компонентах ПМ ККП, преимущественно, находятся на дальностях сигнала прямого прохождения и кромок коллиматора. Это характеризует разницу во времени структуры распределений токов, наводимых на проводящих поверхностях облучателей и коллиматора. Факторами, порождающими эту разницу, являются тепловые деформации и стабильность приёмно-передающих трактов, а также микровибрации РЛК РИК, вызванные вибрациями фундамента здания. На дальностях 7.5–18 м уровни согласованных и кроссполяризационных компонент примерно одинаковы, что указывает на соответствие уровню шума приёмных трактов ВАЦ. Из этого следует, что в пределах рабочей зоны (11–13 м) уровень остаточного фона характеризует чувствительность РИК. Следовательно, уровень остаточного фона вне пределов рабочей зоны может быть исключен из анализа путем операции временного стробирования.

Процедура стробирования выполняется над элементами векторов рассеяния правой части уравнения (7):

$$\dot{m}'_{ij}(\omega) = \dot{m}_{ij}(\omega) * \dot{p}(\omega), \quad (10)$$

где $\dot{p}(\omega)$ – частотный спектр стробирующей функции (прямоугольный импульс), «*» – обозначение операции свёртки. Уравнение (8) принимает вид:

$$\dot{S}_{\Delta I} = \dot{C}^{-1} \dot{M}'_{\Delta I}, \quad (11)$$

где $\dot{M}'_{\Delta I}$ – вектор ККП фона в рабочей зоне ЭДП, полученный в результате стробирования. Аналогичным образом изменяется уравнение (9).

На рисунке 6 представлены результаты оценки частотных зависимостей ЭПР остаточного фона, полученные по данным, приведенным на рисунке 5. На графиках видно, что осцилляции ЭПР без стробирования достигают порядка единиц квадратных сантиметров (-40...-30 дБ) из-за влияния сигнала прямого прохождения и отражений от кромок коллиматора. Это влияние более существенно на согласованных компонентах ПМ потому, что распределение наведенных на проводящих поверхностях токов соответствует поляризации падающей на них волны. При этом, площадь по-

верхностей, не изменяющих направление токов (поверхности второго порядка – рупорная часть облучателей, параболическая поверхность коллиматора) больше, чем площадь поверхностей, изменяющих это направление (стыки и кромки, а также части поверхностей, прилегающие к ним –

края рупорных частей облучателей и кромок коллиматора).

При наложении на приведенные на рисунке 5 дальностные портреты прямоугольного строба, подавляющего все осцилляции вне пределов рабочей зоны (11–13 м), зависимости ЭПР сни-

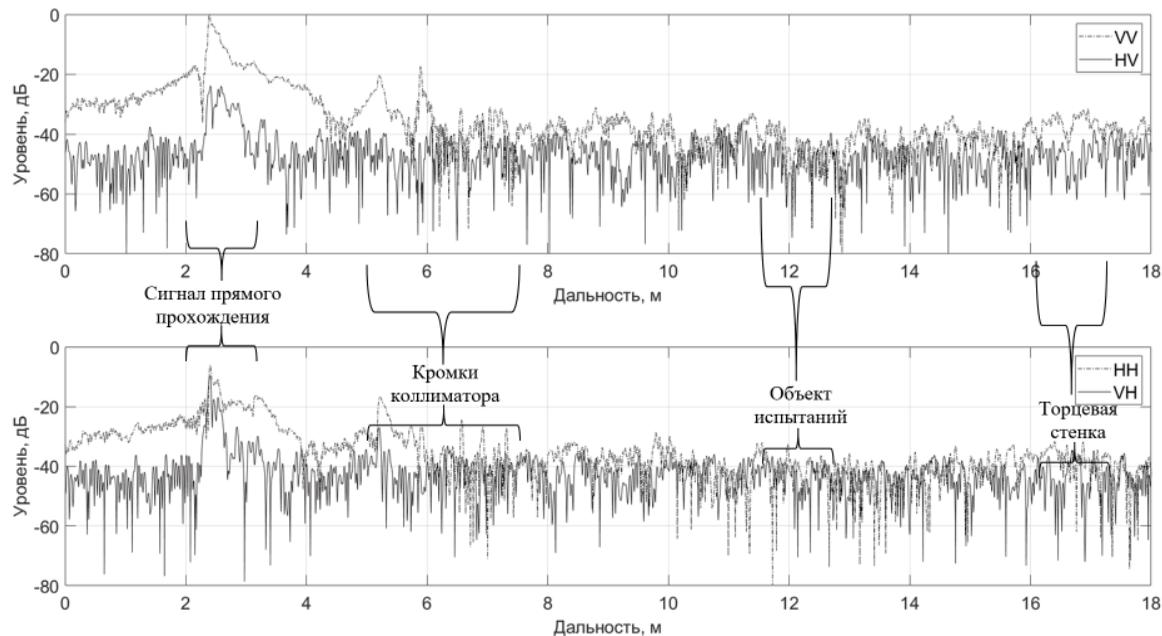
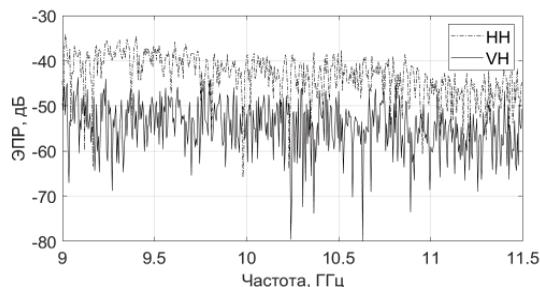
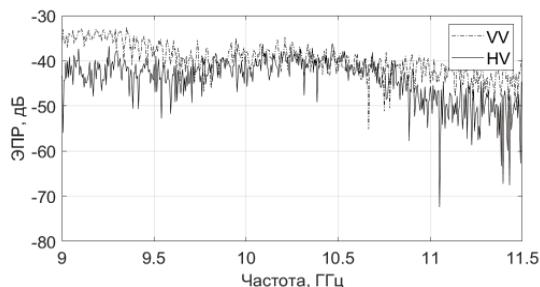


Рисунок 5 – Дальностные портреты разности фонов РИК Без стробирования



Со стробированием

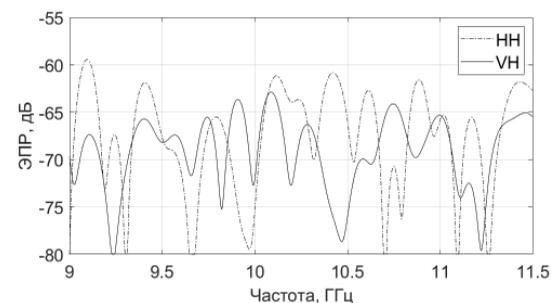
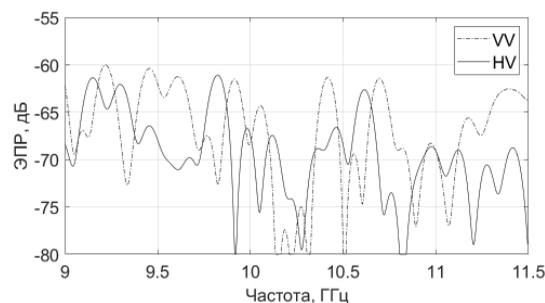


Рисунок 6 – Частотные характеристики ЭПР остаточного фона РИК

жаются до уровней 0.01 мм^2 ($-70 \dots -60 \text{ дБ}$) как на согласованных, так и на кроссполяризационных компонентах ПМ остаточного фона. Из этого следует, что указанные значения ЭПР соответствуют уровню шума РЛК ЭДП. Зная этот уровень, можно определить уровень чувствительности РЛК ЭДП, т.е. нижнюю границу динамического диапазона измеряемых значений ЭПР.

Для вычисления значения среднего уровня остаточного фона, которое можно использовать для расчёта таких метрологических характеристик ЭДП, как «погрешность измерения ЭПР» и «минимальная измеряемая ЭПР», необходимо выполнить усреднение зависимостей элементов ПМ разности фонов $\dot{S}_{\Delta I}$ по частоте и ракурсу, учитывая многоракурсный характер измерений ПМ ККП фона \dot{M}_I (таблица 2):

$$\dot{\sigma}_{\Delta I} = \max\left(\overline{\dot{s}_{xx}^2(\alpha, \omega)} \quad \overline{\dot{s}_{yx}^2(\alpha, \omega)} \quad \overline{\dot{s}_{xy}^2(\alpha, \omega)} \quad \overline{\dot{s}_{yy}^2(\alpha, \omega)}\right)^T, \quad (12)$$

где: α – угол ракурса;

\dot{S}_{ij} – элементы ПМ рассеяния остаточного фона $\dot{S}_{\Delta I}$.

Для случая, показанного на рисунках 5–6, при 10-ти значениях α , значения элементов вектора в уравнении (12) составили, соответственно: $-67,4 \text{ дБ}$ (VV), $-68,8 \text{ дБ}$ (VH), $-67,4 \text{ дБ}$ (HV), $-67,0 \text{ дБ}$ (HH). Оценкой среднего уровня остаточного фона РИК принимается значение -67 дБ (относительно 1 квадратного метра). Согласно вышеприведенным соображениям, минимальной измеряемой ЭПР (нижней границей динамического диапазона РЛК) принимается значение -57 дБ .

Заключение

В представленной работе предлагается способ оценивания среднего уровня остаточного фона, как одной из технических характеристик ЭДП закрытого типа. Данная характеристика требуется для определения метрологических характеристик ЭДП как средства измерения: погрешности измерения ЭПР (или других радиолокационных характеристик) и минимальной измеряемой ЭПР. Представленный способ применим для поляриметрических ЭДП закрытого типа с квазинепрерывным зондирующим сигналом, представляющим собой дискретную сетку частот.

Использованная в работе математическая модель радиолокационного канала ЭДП закрытого типа применима для ЭДП с импульсным зондирующим сигналом, а также для облучающих коллиматор ЭДП антенных систем, построенных по принципам сдвоенной сборки с поляризационными разделителями, и одиночного облучателя с поляризационным разделителем,

работающего в режиме одновременного измерения коэффициента отражения (s_{11}) и коэффициента передачи (s_{21}).

Список используемых источников

1. Галеницкий, А.В. Измерительный комплекс закрытого типа для контроля характеристик рассеяния объектов и радиотехнических характеристик антенн [Текст] / Галеницкий А.В., Глущенко Л.А., Неёлов В.В., Ражев А.В., Самородов Б.А., Фёдоров М.А. // Труды VII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы комплексного обеспечения информационной безопасности и совершенствования образовательных технологий подготовки специалистов силовых структур – КОНФИБ'2016», СПб.: Университет ИТМО, 2016.
2. Малай, И.М. Разработка антенного измерительного комплекса на основе радиоколлиматора для испытаний радиотехнических систем [Текст] / Малай И.М., Титаренко А.В., Озеров М.А. // Труды 15 Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2022», Минск: Издательство Белорусского национального технического университета, 2022.
3. ГОСТ 8.736–2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
4. Галеницкий, А.В. Математическая модель радиолокационного канала прецизионного лабораторного поляриметра [Текст] / Галеницкий А.В., Самородов Б.А. // Вестник метролога. – 2022. – № 3.
5. ГОСТ 13317–89 Элементы соединения СВЧ трактов радиоизмерительных приборов. Присоединительные размеры.
6. Векторные анализаторы электрических цепей Rohde&Schwarz ZVA 8; ZVA 24; ZVA 40. Описание типа. 2007.
7. Wiesbeck W., Kahny D. Single Reference, Three Target Calibration and Error Correction for Monostatic, Polarimetric Free Space Measurements. Proc. of the IEEE, vol. 79, № 10, Oct. 1991. pp. 1551–1558.

**ВТОРИЧНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА – РЕЗЕРВ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА
ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЭТ 14
SECONDARY STANDARD OF DC AND AC ELECTRICAL RESISTANCE UNITS – RESERVE OF THE STATE
PRIMARY STANDARD OF ELECTRICAL RESISTANCE UNITS GET 14**

*Мазур А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Mazur A. V., k.t.s., FSBI «MSHC» of Russia Ministry of Defense (Mytishchi, Moscow Region)
E-mail: mazur_razum@list.ru;
Тел. +7(906)057-93-48*

Аннотация: *Описаны характеристики вторичного эталона единицы электрического сопротивления (ЭС) постоянного и переменного тока (вторичный эталон), являющегося резервом государственного первичного эталона единицы ЭС ГЭТ 14, методы и средства измерений ЭС. Для передачи единицы ЭС реализованы методы сличения, замещения, компарирования. Данные методы исключают некоторые источники погрешностей измерений ЭС, что позволяет значительно расширить диапазоны измерений ЭС без увеличения неисключенной систематической погрешности.*

Annotation: *The characteristics of the secondary standard of the electrical resistance (ER) unit of direct and alternating current (secondary standard), which is a reserve of the state primary standard of the ER unit GET 14, methods and measuring instruments of ER, are described. Methods of comparison, substitution, and comparison are implemented to transfer the ER unit. These methods exclude some sources of measurement errors of ER, which makes it possible to significantly expand the measurement ranges of ER without increasing of the non-excluded systematic error.*

Ключевые слова: электрическое сопротивление, вторичный эталон, меры электрического сопротивления, методы сличения, замещения, компарирования.

Keywords: electrical resistance, secondary standard, measures of electrical resistance, methods of comparison, substitution, comparison.

Первый образец вторичного эталона единицы ЭС создан в 1978 году. Одновременно введена в действие локальная поверочная схема для средств измерений ЭС [1]. В 2003 г. для обеспечения единства измерений проведена модернизация вторичного эталона единицы ЭС [2, 3] и поверочной схемы для средств измерений ЭС постоянного тока. В 2004 г. с применением вторичного эталона единицы ЭС поверено более 100 рабочих эталонов (РЭ) 1, 2 разрядов, а в настоящее время общее количество поверяемых РЭ и высокоточных средств измерений (СИ) увеличилось в несколько раз.

За последнее десятилетие к основному парку РЭ мер ЭС добавились цифровые, термостатированные однозначные и многозначные меры ЭС – калибраторы ЭС постоянного и переменного тока, высокоточные цифровые измерители ЭС постоянного и переменного тока.

Качественно изменился и парк поверяемых РЭ и высокоточных СИ. РЭ пополнились универсальными установками, измерителями сопротивления прецизионными цифровыми, калибраторами сопротивления эталонными, поверочными модулями и др. Технические характеристики новых СИ заметно

превосходят характеристики ранее используемых. Заметно расширен диапазон измеряемых номинальных значений ЭС, диапазон частот переменного тока, увеличена точность измерений. Диапазон измеряемых номинальных значений ЭС ряда приборов превысил 1 ГОм, что больше максимального значения передачи единицы ЭС постоянного тока вторичного эталона единицы ЭС.

Отношение между пределами допускаемой погрешности передачи единицы ЭС установок УКМС-1 и УВТЭС и неисключенной систематической погрешностью (НСП) вторичного эталона единицы ЭС составило менее 2:1. Это сдерживало дальнейшее увеличение точности поверочных установок аналогичного типа. Таким образом, повышение точности и расширение диапазона передачи номинальных значений ЭС стало актуальным.

С 2019 по 2022 год была проведена работа по модернизации вторичного эталона единицы ЭС. В 2023 году модернизированный вторичный эталон единицы ЭС постоянного и переменного тока был утвержден.

Цель настоящей работы – описание возможностей вторичного эталона единицы ЭС и его метрологических характеристик (МХ) (расширение диапазонов

номинальных значений, передачи единицы ЭС постоянного и переменного тока, повышение точности).

Вторичный эталон единицы ЭС состоит из стационарного и транспортируемого комплектов. В состав вторичного эталона единицы ЭС включены современные средства измерений на основе цифрового анализа сигнала – установки для измерений ЭС постоянного тока, измерители ЭС переменного тока и меры ЭС постоянного и переменного тока, с помощью которых можно передавать единицу ЭС эталонным средствам измерений. Применение указанных средств измерений существенно расширяет возможности вторичного эталона единицы ЭС. В их состав входят автоматические мосты-компараторы 6622А и установки 6625А, 6635А постоянного тока, измеритель постоянного тока высокоомный Метеом-01, измерители ЭС переменного тока Е4980А, комплекты эталонных наборов однозначных мер ЭС, персональные вычислительные машины (ПЭВМ) и вспомогательное оборудование для создания условий передачи единицы ЭС – термостаты воздушные и жидкостные. Внешний вид вторичного эталона единицы ЭС представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид вторичного эталона единицы ЭС

В таблицах 1 и 2 приведены диапазоны номинальных значений ЭС постоянного и переменного тока, в которых осуществляется передача единицы ЭС от вторичного эталона единицы ЭС РЭ и высокоточным СИ, среднее квадратическое отклонение суммарной погрешности ($S_{\Sigma 0}$), суммарная стандартная неопределенность при 10 независимых измерениях ($u_{\Sigma 0}$), относительная нестабильность ЭС за год (v_0), доверительная относительная погрешность при доверительной вероятности 0,95 (δ_0).

Таблица 1

МХ вторичного эталона единицы ЭС

Наименование составной части вторичного эталона	Диапазоны номинальных значений	Показатели точности, не более		
		$S_{\Sigma 0} \cdot 10^{-7}$	$u_{\Sigma 0} \cdot 10^{-7}$	$v_0 \cdot 10^{-7}$
Эталон-копия	1 Ом	0,4	0,4	5
	100 Ом	0,3	0,3	1
	10 кОм	0,4	0,4	1
Комплект вторичных эталонов ЭС постоянного тока	1, 10 мОм	2	2	20
	100 мОм	1	1	10
	1 Ом	0,5	0,5	5
	10 Ом	1	1	10
	100 Ом	1,5	1,5	10
	1 кОм	1,5	1,5	15
	10, 100 кОм	2	2	20
	1, 10, 100 МОм	7	7	40
1 ГОм	7	7	60	

Таблица 2

МХ вторичного эталона единицы ЭС

Наименование составной части вторичного эталона	Номинальное значение	Показатели точности, не более	
		$\delta_0 \cdot 10^{-7}$	$v_0 \cdot 10^{-7}$
Комплект эталонов ЭС переменного тока 1-го разряда частотой 1 кГц	1 мОм	3000	600
	10 мОм	3000	600
	100 мОм	1000	200
	1 Ом	100	100
	10 Ом	50	100
	100 Ом	20	100
	1 кОм	20	100
	10 кОм	20	100
	100 кОм	50	100
	1 МОм	100	100
10 МОм	100	100	
Комплект эталонов ЭС постоянного тока 2-го разряда	10 ГОм	500	1000
	100 ГОм	2000	5000
	1 ТОм	10000	20000

Принцип действия вторичного эталона единицы ЭС заключается в передаче единицы ЭС реализованными методами сличения, замещения, компарирования, изложенными в [4]. Данные методы исключают некоторые источники погрешностей измерений ЭС, что позволяет значительно расширить диапазоны измерений ЭС без увеличения не исключенной систематической погрешности.

Упрощенная блок-схема автоматического компаратора ЭС постоянного тока 6625А с расширителем 6623А и сканером 6664С показана на рисунке 2. Реализация данной схемы в вторичном эталоне единицы ЭС позволила реализовать одновременную передачу единицы ЭС 10 РЭ в диапазоне от 1 мОм до 100 МОм.

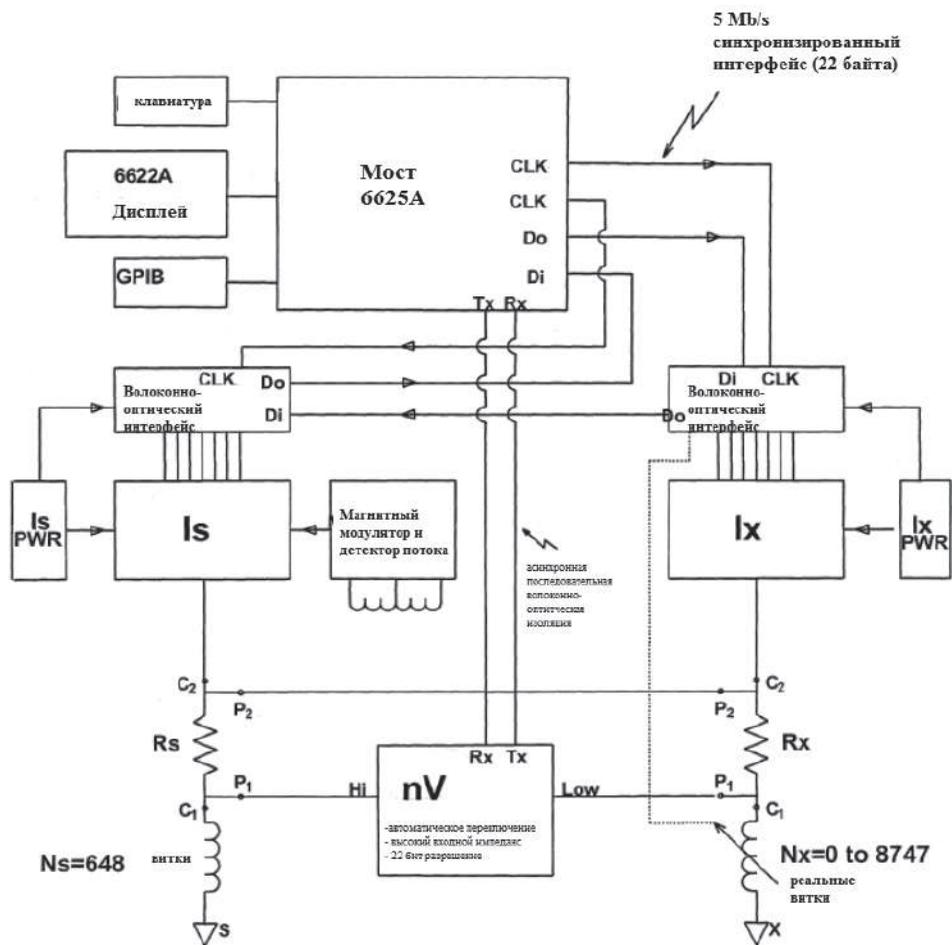


Рисунок 2 – Упрощенная блок-схема автоматического компаратора ЭС постоянного тока

Для подключения эталонного и неизвестного резистора есть два комплекта четырехклеммных соединений. Ток (Ix), управляемый микропроцессором, проходит через обмотку компаратора с переменным числом витков (Nx) и через неизвестное ЭС (Rx). Дополнительный изолированный, управляемый микропроцессором ток (Is), который является линейной функцией числа витков (Nx), проходит через дополнительную обмотку (Ns) и эталонный резистор (Rs). Токи (Is) и (Ix), текущие соответственно в обмотках (Ns) и (Nx), генерируют общий разбаланс магнитного потока в детекторе обмоток (Nd). Этот разбаланс

пропорционален общей ампер-витковой ошибке между двумя обмотками $[(Is) \times (Ns)]$ и $[(Ix) \times (Nx)]$. Этот разбаланс регистрируется чувствительным детектором обмоток и электронным пиковым детектором, генерируя сигнал, пропорциональный знаку и величине ампер-витковой ошибки. Это напряжение используется цепью с замкнутой петлей обратной связи для регулировки дополнительного тока (Is), для сведения (ампер-витковой) ошибки к нулю. При балансе отношение двух токов (Ix и Is), текущих в двух обмотках, такое же, как отношение витков обмоток (Nx и Ns). В приборе поддерживается полная электриче-

ская изоляция между протекающими токами путем использования оптоволоконной технологии. Для передачи данных между каждым функциональным компонентом и встроенным микроконтроллером также используется оптоволоконная связь. Связь между двумя половинами моста существует только за счет подключения неизвестного (R_x) и эталонного (R_s) резисторов и нановольтового детектора. Для дополнительной изоляции половин моста используется методика изоляции источников питания. Нановольтовый детектор имеет усилитель с высоким входным импедансом (>1 ГОм), способный измерять сигналы нановольтового уровня с типовой точностью линейности 14 бит (до максимум 22 бита). Автоматический мост-компаратор постоянного тока использует этот усилитель для измерения разности напряжений двух цепей моста (разбаланс моста). Знание величины эталонного резистора (R_s), разбаланса моста и подтверждение поддержания ампер-виткового баланса с настройками числа витков (N_x и N_s) и токов (I_x и I_s) позволяет вычислить значение неизвестного резистора (R_x).

Упрощенная блок-схема установки для измерения ЭС постоянного тока 6535 со сканером на 16 каналов 6564, набором термостатированных мер (от 10 МОм до 1 ТОм) 6636 показана на рисунке 3. Реализация данной схемы в вторичном эталоне единицы ЭС позволила реализовать одновременную передачу единицы ЭС 16 РЭ в диапазоне от 10 МОм до 1 ТОм.

При измерении ЭС известное испытательное напряжение постоянного тока, подаваемое от установки 6535, вызывает протекание тока через неизвестный резистор в интегратор. Величина этого тока определяется временем, необходимым для выхода интегратора, чтобы пройти между двух различных точек порогового напряжения. Зная испытательное напряжение и величину тока, микропроцессор может определить неизвестное значение резистора. Испытательное напряжение выбирается из 7 стандартных значений в диапазоне \pm (от 1 до 1000 В) постоянного напряжения. Стандартные значения $\pm 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000$ В.

Неизвестные токи могут быть измерены путем подключения неизвестного выходного тока источника непосредственно ко входу интегратора (внутренний источник испытательного напряжения не используется при измерении токов).

Стабильность установки 6535 зависит от стабильности приложенного испытательного напряжения, интегратора, цепи синхронизации и детектора порогового напряжения на выходе интегратора. Фиксированные отклонения в абсолютных значениях этих параметров компенсируются при калибровке с помощью процедуры калибровки программного обеспечения в сочетании с набором внешних термостатированных калибровочных резисторов с известным значением, которые идеально подходят для этой цели.

Установка 6535 полностью автоматизирована с применением внутреннего микропроцессора и обеспечивает повышенную точность с помощью

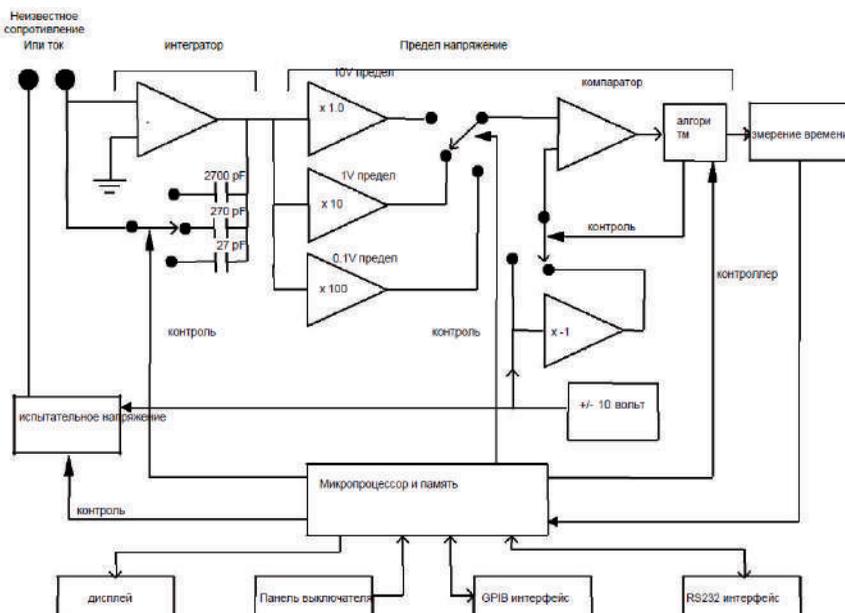


Рисунок 3 – Упрощенная блок-схема установки для измерения ЭС

интегрированных опций фильтрации и проведения измерений с испытательным напряжением изменяемой полярности.

Суть метода измерения ЭС исследуемого сопротивления заключается в измерении высоких значений ЭС зарядки небольшого конденсатора через измеренное ЭС по формулам:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}(t)}{\Delta t} = \frac{U_{\text{исп}}}{R \times C}, \quad 1)$$

$$R = \frac{U_{\text{исп}} \times \Delta t}{C \times \Delta U_{\text{вых}}}, \quad 2)$$

$$U_{\text{исп}} = iR, \quad 3)$$

$$i = \frac{C \times \Delta U_{\text{вых}}}{\Delta t}, \quad 4)$$

где $\Delta U_{\text{вых}}$ – изменения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ через время Δt , В; Δt – изменения времени, с; $U_{\text{исп}}$ – испытательное напряжение для измерения ЭС, В; C – стабильный конденсатор с номинальными значениями емкости 27, 270, 2700, пФ; R – измеряемое сопротивление, Ом.

Значения разности потенциалов $\Delta U_{\text{вых}}$ между двумя пороговыми напряжениями положительной и отрицательной полярности определяется формулой:

$$U_{\text{вых}} = 2 \cdot U_{\text{порог}}, \quad 5)$$

где $U_{\text{порог}}$ – пороговое напряжение в измерительной схеме установки 6535, выбирается из ряда номинальных значений 0,1, 1, 10 В.

Для подтверждения МХ вторичного эталона единицы ЭС проведены следующие исследования: анализ НСП; исследование составляющих погрешностей в расширенных диапазонах номинальных значений ЭС и частотах переменного тока; сопоставление результатов измерений трех реализованных независимых методов измерения ЭС, исследование предельных возможностей СИ, входящих в его состав.

При испытаниях опытного образца вторичного эталона единицы ЭС проведены исследования метрологических и технических характеристик.

Результаты исследований отражены в таблице 3.

Таким образом, можно сделать вывод, что вторичный эталон единицы ЭС разработан на основе новейших цифровых технологий с использованием опыта разработок предыдущих эталонов и поверочных

Таблица 3

Результаты определения МХ вторичного эталона единицы ЭС

Наименование МХ	Значение МХ	
	определенные экспериментально	требуемые
Номинальные значения хранимой и передаваемой единицы ЭС, Ом	1 100 10 ⁴	1 100 10 ⁴
СКО суммарной погрешности:		
1 Ом	0,3·10 ⁻⁷	не более 0,4·10 ⁻⁷
100 Ом	0,3·10 ⁻⁷	0,3·10 ⁻⁷
10 кОм	0,3·10 ⁻⁷	0,4·10 ⁻⁷
Суммарная стандартная неопределенность:		
1 Ом	0,3·10 ⁻⁷	не более 0,4·10 ⁻⁷
100 Ом	0,3·10 ⁻⁷	0,3·10 ⁻⁷
10 кОм	0,3·10 ⁻⁷	0,4·10 ⁻⁷
Отн. нестабильность ЭС за год:		
1 Ом	4·10 ⁻⁷	не более 5·10 ⁻⁷
100 Ом	1·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁷
10 кОм	1·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁷
Диапазон номинальных значений хранимой и передаваемой единицы ЭС, Ом	от 1·10 ⁻³ до 1·10 ⁹	от 1·10 ⁻³ до 1·10 ⁹
Суммарная стандартная неопределенность	от 0,4·10 ⁻⁷ до 6·10 ⁻⁷	от 0,5·10 ⁻⁷ до 7·10 ⁻⁷

Наименование МХ	Значение МХ		
	определенные экспериментально	требуемые	
Отн. нестабильность ЭС за год	от $3 \cdot 10^{-7}$ до $50 \cdot 10^{-7}$	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $60 \cdot 10^{-7}$	
Номинальные значения хранимой и передаваемой единицы ЭС, ГОм	10	10	
	100	100	
	1000	1000	
Доверительная отн. погрешность при доверительной вероятности 0,95	10 ГОм	не более $500 \cdot 10^{-7}$	
	100 ГОм		$2000 \cdot 10^{-7}$
	1000 ГОм		$10000 \cdot 10^{-7}$
Отн. нестабильность ЭС за год	10 ГОм	не более $1000 \cdot 10^{-7}$	
	100 ГОм		$5000 \cdot 10^{-7}$
	1000 ГОм		$20000 \cdot 10^{-7}$
Номинальные значения хранимой и передаваемой единицы ЭС, Ом	от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^7$	от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^7$	
Доверительная отн. погрешность при доверительной вероятности 0,95	от $20 \cdot 10^{-7}$ до $3000 \cdot 10^{-7}$	от $20 \cdot 10^{-7}$ до $3000 \cdot 10^{-7}$	
Отн. нестабильность ЭС за год	от $5 \cdot 10^{-7}$ до $570 \cdot 10^{-7}$	от $100 \cdot 10^{-7}$ до $600 \cdot 10^{-7}$	
Сличение единицы ЭС пост. тока	от 1 мОм до 1 ТОм	от 1 мОм до 1 ТОм	
Доверительная отн. погрешность при доверительной вероятности 0,95 или пределы допускаемой отн. погрешности определения действ. значения ЭС	от $5 \cdot 10^{-7}$ % до 0,008 %	от 0,00005 % до 0,05 %	
Сличение единицы ЭС постоянного тока	от 1 мОм до 10 МОм	от 1 мОм до 10 МОм	
Доверительная отн. погрешность при доверительной вероятности 0,95 или пределы допускаемой отн. погрешности определения действ. значения ЭС	от 0,001 % до 0,04 %	от 0,001 % до 0,05 %	

установок на основе аналоговых устройств и является резервом государственного первичного эталона ГЭТ 14. Точность созданного вторичного эталона единицы ЭС соответствует требованиям [5] для вторичных РЭ ЭС постоянного и переменного тока и достаточна для передачи единицы ЭС всем известным и вновь разрабатываемым РЭ и высокоточным СИ ЭС, а расширенные диапазоны номинальных значений измеряемых значений ЭС охватывают как уже созданные, так и перспективные СИ.

МХ вторичного эталона единицы ЭС в рамках модернизации улучшены по следующим показателям: увеличен диапазон передачи единицы ЭС постоянного тока в 1000 раз, введены функции передачи единицы ЭС переменного тока в диапазоне от десятков мОм до сотен МОм в широком диапазоне частот, одновременной передачи единицы ЭС постоянного тока РЭ, что уменьшило время передачи в несколько раз, в состав вторичного эталона единицы ЭС введен транспортируемый комплект, который позволяет исследовать МХ РЭ на местах их эксплуатации. Возможности вторичного эталона

единицы ЭС в области единства измерений ЭС позволяют обеспечить потребности в ближайшие 10–15 лет. Вместе с тем, общее развитие цифровых СИ ЭС требует новых подходов к прослеживаемости параметров ЭС сверхмалых и сверхбольших диапазонов к вторичному эталону единицы ЭС.

Литература

1. Локальная поверочная схема для средств измерений электрического сопротивления постоянного тока.
2. Методика поверки мер электрического сопротивления из состава рабочих эталонов на вторичном эталоне. – 2003. – 12 с.
3. Вторичный эталон единицы электрического сопротивления. Формуляр – 2003. – 26 с.
4. Методика передачи единицы электрического сопротивления постоянного и переменного тока эталонам и СИ на месте дислокации вторичного эталона единицы ЭС.
5. Приказ Росстандарта № 3456 от 30 декабря 2019 года «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений электрического сопротивления постоянного и переменного тока».

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Журнал «Вестник метролога» издается и распространяется на русском языке с 2005 года.

В журнале «Вестник метролога» публикуются научные статьи по всем разделам метрологии. К публикации принимаются законченные оригинальные работы по фундаментальным исследованиям в области метрологии; научные статьи, содержащие новые экспериментальные результаты; методические работы, включающие описание новых методик измерений; материалы теоретического характера с изложением новых принципов, подходов к обеспечению единства и точности измерений и др. Статья должна содержать четкую постановку задачи и выводы с указанием области применения результатов.

Направляя свою статью в журнал, автор подтверждает, что присланный в редакцию материал ранее нигде не был опубликован (за исключением статей, представленных на научных конференциях, но не опубликованных в полном объеме, а также тех, которые приняты к публикации в виде материалов научной конференции, обычно в форме тезисов, части лекции, обзора или диссертации) и не находится на рассмотрении в других изданиях.

Автор дает согласие на издание статьи на русском языке в журнале «Вестник метролога». При согласовании отредактированной статьи автор должен сообщить в редакцию по электронной почте о согласии на публикацию на русском языке.

Подавая статью, автор должен ставить в известность редактора о всех предыдущих публикациях этой статьи, которые могут рассматриваться как множественные или дублирующие публикации той же самой или близкой по смыслу работы. Автор должен уведомить редактора о том, содержит ли статья уже опубликованные материалы. В таком случае в новой статье должны присутствовать ссылки на предыдущую публикацию.

Все представленные статьи рецензируются. Датой принятия статьи считается дата получения положительной рецензии.

При разногласиях между автором и рецензентами окончательное решение о целесообразности публикации статьи принимает редакционный совет журнала. В случае отклонения статьи редакционным советом дальнейшая переписка с автором прекращается.

Авторам, гражданам России, следует представить экспертное заключение о том, что работа может быть опубликована в открытой печати. Экспертное заключение может быть прислано в печатном виде или по электронной почте в сканированном виде.

Публикация статей в журнале осуществляется бесплатно.

Отски опубликованных статей авторам не высылаются.

Статьи в редакцию следует представлять в напечатанном виде в 2-х экземплярах с приложением электронного носителя CD-R/CD-RW или присылать по электронной почте. Все файлы должны быть проверены антивирусной программой!

Объем статьи, включая аннотации на русском и английском языках, таблицы, подписи к рисункам, библиографический список, **не должен превышать 15 машинописных страниц**, количество рисунков – не более 4-х (рисунки а, б считаются как два).

Аннотация должна быть краткой, не более 10 строк (до 250 слов), коротко и ясно описывать основные результаты работы. Ключевых слов – не более 7.

Название статьи, фамилии авторов и место работы, аннотация и ключевые слова должны быть приведены на русском и английском языках.

Материал статьи – текст, включая аннотации на русском и английском языках, список литературы, подписи к рисункам и таблицы, оформляются одним файлом, графические материалы – отдельными файлами с соответствующей нумерацией (рисунок 1, рисунок 2 и т. д.).

Статья должна содержать УДК.

Статья должна быть подписана автором (авторами) с указанием фамилии, имени и отчества полностью, ученой степени, ученого звания, места работы, контактных телефонов, электронного адреса.

При подготовке материалов должны быть использованы следующие компьютерные программы и нормативные документы.

Текстовый материал должен быть набран в Microsoft Office Word 2007 (или более поздние версии); шрифт основного текста Times New Roman, размер шрифта – 14, межстрочный интервал – полуторный, выравнивание по ширине; параметры страницы – верхнее поле 2,3 см, нижнее 2,3 см, левое 3,9 см, правое 1,5 см; для оформления текста можно использовать курсив или полужирный.

Статьи присылать с минимумом форматирования, не использовать стили и шаблоны.

Все условные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснить в основном или подрисуночных текстах. Размер рисунка не должен превышать 14×20 см.

Формулы должны быть набраны в MS Word с помощью над- и подстрочных знаков, специальных символов или в программе MathType (версия 4.0 и выше). Показатели степеней и индексы должны быть набраны выше или ниже строки буквенных обозначений, к которым они относятся: K^{12} , A^3 , B_2 .

Формулы должны быть единообразными и целыми, т. е. недопустимо величины в одной формуле набирать в разных программах.

После формулы должна быть приведена экспликация (расшифровка всех приведенных буквенных обозначений величин). Последовательность расшифровки буквенных обозначений должна соответствовать последовательности расположения этих обозначений в формуле.

Нумеровать следует только наиболее важные формулы, на которые есть ссылка в последующем тексте.

Таблицы (и ссылки на них) должны иметь последовательные порядковые номера и заголовки.

Единицы измерений и буквенные обозначения физических величин должны отвечать требованиям ГОСТ 8.417–2002 «ГСИ. Единицы величин», а термины – требованиям соответствующих государственных стандартов.

В библиографических ссылках фамилии авторов и названия журналов и книг следует указывать в оригинальной транскрипции. Ссылки дают в соответствии с ГОСТ 7.0.5–2008 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Для книг указывают фамилию и инициалы автора, заглавие, том (часть, выпуск), место, название издательства, год издания. Для журнальных статей – фамилию и инициалы автора, названия статьи и журнала, год издания, том или часть, номер (выпуск), страницы.

Ссылки в тексте на источники, указанные в списке используемой литературы, отмечаются цифрами в квадратных скобках, в порядке упоминания в тексте, например [1], [2–4].

В библиографическом списке должно быть указано не менее 2–3 работ, опубликованных за последние 10 лет.

NOTE AUTHORS

«Vestnik Metrologa» magazine is published and extends in Russian since 2005.

«Vestnik Metrologa» scientific articles according to all sections of metrology are published in the magazine. To the publication the finished original operations on basic researches in the field of metrology are accepted; the scientific articles containing new experimental results; the methodical operations including the description of new techniques

of execution of measurements; materials of theoretical character with presentation of the new principles, approaches to support of unity and accuracy of measurements, etc. Article shall contain accurate problem definition and outputs with specifying of a scope of results.

Sending the article to log, the author confirms that the material sent to edition wasn't published earlier anywhere (except for the articles provided at scientific conferences, but not published in full and also those which

are accepted to the publication in the form of materials of a scientific conference is normal in the form of theses, a part of a lecture, the review or the thesis) and isn't under consideration in other issuings.

The author agrees to issuing of article in Russian in Bulletin of the Metrologist log. In case of coordination of the edited article the author shall report in edition by e-mail about a consent to the publication in Russian.

Submitting article, the author shall inform the editor of all previous publications of this article which can be considered as multiple or duplicating the same publication or faithful operation. The author shall notify the editor on whether article contains already published materials. In that case at new article there shall be links to the previous publication.

All provided articles are reviewed. The date of receipt of the positive review is considered acceptance date of article.

In case of disagreements between the author and reviewers the final decision on feasibility of the publication of article is made by editorial council of log. **In case of a rejection of article by editorial council further correspondence with the author stops.**

To authors, citizens of Russia, it is necessary to provide the expert opinion that operation can be published in the open printing. The expert opinion can be sent in printed form or by e-mail in the scanned look.

The publication of articles in log is carried out free of charge.

Prints of the published articles aren't sent to authors.

2. Articles in edition should be presented in the printed form in duplicate with application of the CD-R/CD-RW electronic medium or to send by e-mail. All files shall be checked by the anti-virus program!

Article volume, including summaries in the Russian and English languages, tables, signatures to figures, the bibliography, shan't exceed 15 typewritten pages, quantity of figures – no more than 4 (figures and, would be considered as two). The summary shall be short, no more than 10 lines (to 250 words), shortly and it is clear to describe the main results of operation. Keywords – no more than 7.

The name of article, surname of authors and the place of operation, the summary and keywords shall be given in the Russian and English languages. Article material – the text, including summaries in the Russian and English languages, the list of references, signatures to figures and tables, are made out by one file, graphic materials – separate files with the appropriate numbering (fig. 1, fig. 2 etc.).

Article shall contain UDC (Universal Decimal Classification). Article shall be signed by the author (authors) with specifying of a surname, name and middle name completely, an academic degree, an academic status, the place of operation, contact phones, the e-mail address.

3. By preparation of materials the following computer programs and normative documents shall be used.

Text material shall be collected in Microsoft Office Word 2007 (or later versions); a font of the body text Times New Roman, type size – 14, line spacing – one-and-a-half, alignment on width; page setup – a top margin of 2,3 cm, the lower 2,3 cm, the left 3,9 cm, the right 1,5 cm; for design of the text it is possible to use italic type or bold.

To send articles with a formatting minimum, not to use styles and templates.

All reference designations given on figures need to be explained in the main or captions. The size of a figure shan't exceed 14×20 of cm.

Formulas shall be collected in MS Word with the help over – and subscript signs, special characters or in the MathType program (version 4.0 above). Indices of levels and indexes shall be collected above or lines of letter symbols which they treat are lower: K^{12} , A^3 , B_2 or lines of letter symbols to which they belong are lower: K^{12} , A^3 , B_2 .

Formulas shall be uniform and whole, i.e. inadmissibly gain values in one formula in different programs. After a formula the explication (decryption of all given letter symbols of values) shall be given. The sequence of decryption of letter symbols shall correspond to the sequence of layout of these designations in a formula.

It is necessary to number only the most important formulas on which there is a link in the subsequent text.

Tables (and references to them) shall have sequential sequence numbers and titles.

Units of measurements and letter symbols of physical quantities shall meet the requirements of GOST 8.417-2002 “GSI. Units of values”, and terms – to requirements of the appropriate state standards.

In bibliographic links of a surname of authors and names of logs and books it is necessary to specify in an original transcription. References are given according to GOST 7.0.5-2008 “System of standards according to information, library and to publishing. Bibliographic link. General requirements and rules of compilation”.

For books specify a surname and the author's initials, the title, volume (a part, release), the place, the name of publishing house, year of issuing. For journal articles – a surname and initials of the author, the name of article and log, year of issuing, volume or a part, number (release), pages.

Links in the text to the sources specified in the list of the used literature are marked by digits in square brackets, as mentioning in the text, for example [1], [2-4].

In the bibliography at least 2-3 operations published over the last 10 years shall be specified.

Tables (and references to them) shall have sequential sequence numbers and titles.

Units of measurements and letter symbols of physical quantities shall meet the requirements of GOST 8.417-2002 “GSI. Units of values”, and terms – to requirements of the appropriate state standards.

In bibliographic links of a surname of authors and names of logs and books it is necessary to specify in an original transcription. References are given according to GOST 7.0.5-2008 “System of standards according to information, library and to publishing. Bibliographic link. General requirements and rules of compilation”.

For books specify a surname and the author's initials, the title, volume (a part, release), the place, the name of publishing house, year of issuing. For journal articles – a surname and initials of the author, the name of article and log, year of issuing, volume or a part, number (release), pages.

Links in the text to the sources specified in the list of the used literature are marked by digits in square brackets, as mentioning in the text, for example [1], [2-4]. In the bibliography at least 2-3 operations published over the last 10 years shall be specified.

ПОДПИСКА

Принимается подписка на ежеквартальный журнал

«Вестник метролога»

Читатели могут оформить подписку

nikiforova@vniiftri.ru

тел. 8(495) 944–56–41, Никифорова Надежда Николаевна,

Индекс – 45112 по Объединенному каталогу

«Пресса России»

<http://www.ppressa-rf.ru/cat/1/edition/e45112/>



ПЕРЕЧЕНЬ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2024 ГОДУ

ФИО / Название статьи	номер	страница
Общие вопросы метрологии		
Зуйков М.Ю., ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», Рыбачев И.И., аспирант ФГБОУ ВО «УГТУ», Храменков А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Попова Е.В., доктор экономических наук, профессор ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова»	1	3
Цифровой двойник как основа автоматизации метрологической службы		
Супрунюк В.В., д.т.н., ведущий научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Кувькин Ю.А., к.т.н., старший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Максак А.Г., к.т.н., начальник отдела, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Горбачев А.А., старший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России	1	9
Проверка измерительных систем на объекте установки с использованием цифровой информации		
Щурин К. В., д.т.н., профессор, «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область, Воейко О.А., к.т.н., доцент, заведующая кафедрой Управления качеством и стандартизации, «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область	1	14
Информационный анализ эффективности методов неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций		
Захаров Е.Н., д.т.н., профессор, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России	1	22
Общий анализ существующего уровня технологического интеллекта и возможностей их применения в системе метрологического обеспечения		
Храменков В.Н., д.т.н., профессор, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Надеин В.В., к.п.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России	2	3
Метод повышения точности измерений параметров разрабатываемого технического объекта		
Бачурин Д.П., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Микрюков А.Н., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России	2	6
Об особенностях средств измерений военного назначения		
Иванов Ю.М., к.т.н., АО «МЕРА», Клейменов Ю.А., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России	2	10
Совершенствование системы передачи единиц величин на основе реализации удаленной бездемонтажной поверки (калибровки) средств измерений		
Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Руденкова Е. Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России	2	15
Новые проектные решения и способы их эффективного применения на современном этапе в области лазерной, оптической и оптоэлектронной техники ведущих предприятий России		
Храменков В.Н., д.т.н., профессор, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России	3	6
Обоснование требований к достоверности поверки средств измерений (измерительных каналов измерительных систем), применяемых для комплектации разрабатываемого технического объекта		
Тупицина А.В., ФГБУ «ВНИИР»	3	8
Метрологический диагностический контроль массспектрометрических анализаторов влажности в процессе испытаний микросхем в герметичных корпусах. проблемы и решения		
Стяжкин В.А., к.т.н., научно-технический комитет (Метрологической службы ВС РФ), базовая кафедра Технологического университета; Хайруллин Р.З., д.ф.-м.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московский государственный строительный университет, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России	3	14
Корреляция математической и эмпирической моделей поля ионизирующих излучений дозиметрической установки унд-интер .		
Кувькин Ю.А., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Супрунюк В.В., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Храменков В.Н., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Хайруллин Р.З., д.ф.-м.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет	4	8
Оценка эффективности контроля стабильности метрологических характеристик источников измерительной информации в процессе эксплуатации с использованием теории полумарковских моделей		

ФИО / Название статьи	номер	страница
Кабатов В.В., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Проконишин В.Н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России Некоторые современные проблемы традиционной метрологии и пути их решения. Анализ перспектив и потенциала развития квантовой метрологии	4	12
Кочугуров Н.Е., АО «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз», Целмс Р.Н., к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Скорянов Н.Н., к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; Руденкова Е.Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России Вопросы дистанционной передачи измерительной информации для испытаний моделей кораблей и судов	4	16
Галеницкий А.В., к.т.н., Самородов Б.А., Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского Оценивание характеристик остаточного фона электродинамического полигона закрытого типа	4	21
Модели погрешностей эталонов		
Дорохов А.Н., к.т.н., доцент, Емельянов Д.В., Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского Модель технического состояния при хранении эталона единицы величины	1	27
Частотно-временные измерения		
Малыхина Г.Ф. ¹ , Мухидинова Н.Ш. ¹ ¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия Технология диагностики ауторегуляции мозгового кровотока на основе вейвлетов для интегрированных платформенных решений в цифровой медицине	1	32
Измерения геометрических величин		
Новикова И. В., ФГУП «ВНИИФТРИ» Исследование влияния прямолинейности линейного компаратора на погрешность измерения длины	2	19
Кузнецов А.А., ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж Метод итеративной регуляризованной оценки параметров динамических систем	2	23
Колобашкина Т. В., доцент, кандидат технических наук, доцент, Скорянов Н.Н., доцент, кандидат технических наук, доцент, Р. Н. Целмс, доцент, кандидат технических наук, Скоков М.А., студент, *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения Получение модельных аэрозолей для испытания пылеизмерительной аппаратуры	3	20
Измерения электрических величин		
Ольховский А.Н., к.т.н., старший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Кувькин Ю.А., к.т.н., старший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Щедрин А.Ю., младший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России О реализации процедур метрологического самоконтроля пьезоэлектрических вибропреобразователей с внутренним возбуждением деформации чувствительных элементов на месте их установки	3	24
Мазур А.В., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России Вторичный эталон единицы электрического сопротивления постоянного и переменного тока – резерв государственного первичного эталона единицы электрического сопротивления ГЭТ 14	4	30
Измерения радиотехнических величин		
Медведев И.Н., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Семёнов А.А., к.т.н., Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского Влияние внешнего магнитного поля на плоскополяризованные электромагнитные волны дециметрового диапазона при радиолокационных измерениях	4	3
Измерения ионизирующих излучений		
Стяжкин В.А., к.т.н., научно-технический комитет (Метрологической службы ВС РФ), базовая кафедра Технологического университета Построение математической модели поля ионизирующих излучений замкнутых дозиметрических установок типа упд-интер	2	32
Измерение магнитного поля		
Фокина Н.Н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России Фокин А.П., к.т.н., ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Теоретические основы решения навигационной задачи через непрерывное измерение вектора магнитной индукции магнитного поля земли	3	35

ФИО / Название статьи	номер	страница
Оптические и оптико-физические измерения величин		
<i>Хатеев А.С., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России</i> Обеспечение поверки средств измерений относительного распределения плотности энергии лазерного излучения, входящих в состав комплексов контроля космического пространства, в местах их эксплуатации	4	5
Информация		
ПЕРВОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ XV Всероссийская научно-техническая конференция «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации» (20–22 ноября 2024 года)	2	37
Новинки измерительной техники		
Миллитесламетр портативный универсальный ТП2–2У	1,2,3,4	Обложка
Акустооптический модулятор-частотосдвигатель	1,2,3,4	Обложка
Измеритель временных интервалов ИВИ-01	1,2,3,4	Обложка
Стандарт частоты сверхминиатюрный квантовый НАП-КПП	1,2,3,4	Обложка
Комплекс для оперативного определения составляющих уклонений отвесной линии	1,2,3,4	Обложка
Испытания и поверка навигационной аппаратуры потребителей	1,2,3,4	Обложка
Информация		
Информация для авторов рукописей, предлагаемых к публикации в журнале «Вестник метролога»	2,3	39
Информация для подписчиков и читателей журнала	3,4	40
Перечень статей и материалов, опубликованных в 2024 году	4	38–40

Прейскурант на 2025 год

Наименование	Периодичность издания	Цена за 1 номер (руб.) с НДС
Журнал «Вестник метролога»	4 раза в год	1 200,00
«Вестник метролога» по подписке	4 раза в год	1 200,00
Журнал «Альманах современной метрологии»	4 раза в год	1 500,00

Расценки на размещение рекламы в журнале «Вестник метролога»

Формат модулей (стр.)	Расположение в номере	Цена (руб.) черно-белой полосы	Цена (руб.) цветной полосы
1	Обложка - 2 страница	17 000	18 500
1	Обложка - 3 страница	16 000	17 000
1	Обложка - 4 страница	16 000	17 000
1	Внутренний блок	16 000	17 000
1/2	Внутренний блок	8 000	8 500
1/3	Внутренний блок	5 500	6 000
1/4	Внутренний блок	4 000	4 500