

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 25.12.2017 г. за № 2210).

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. Вышлов, 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:

Надеин В.В., к.п.н., доцент,

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

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;

Отпечатано ООО «ПРИНТ»
Юридический адрес:125413, Россия,
г. Ижевск,

Сдано в набор 09.04.2024
Подписано в печать 20.04.2024
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

Общие вопросы метрологии

Храменков В.Н., д.т.н., профессор, ФГБУ «ГНМЦ»
Минобороны России, Надеин В.В., к.п.н., доцент, ФГБУ
«ГНМЦ» Минобороны России
Метод повышения точности измерений параметров
разрабатываемого технического объекта 3

Бачурин Д.П., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Микрюков А.Н., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Об особенностях средств измерений военного назначения 6

Иванов Ю.М., к.т.н., АО «МЕРА»
Клейменов Ю.А., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Совершенствование системы передачи единиц величин на
основе реализации удаленной бездемонтированной поверки
(калибровки) средств измерений 10

Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Руденкова Е. Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Новые проектные решения и способы их эффективного
применения на современном этапе в области лазерной,
оптической и оптоэлектронной техники ведущих предприятий
России 15

Измерения геометрических величин

Новикова И. В., ФГУП «ВНИИФТРИ»
Исследование влияния прямолинейности линейного
компаратора на погрешность измерения длины 19

Кузнецов А.А., к.т.н., доцент, ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж
Метод итеративной регуляризированной оценки параметров
динамических систем 23

Измерения ионизирующих излучений

Стяжкин В.А., к.т.н., научно-технический комитет
(Метрологическая служба ВС РФ), базовая кафедра
Технологического университета
Построение математической модели поля ионизирующих
излучений замкнутых дозиметрических установок
типа упд-интер 32

Информация

ПЕРВОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ
XV Всероссийская научно-техническая конференция
«Метрологическое обеспечение обороны и безопасности
в Российской Федерации» (20–22 ноября 2024 года) 37

К сведению авторов 39

VM 2/2024

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 25.12.2022 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

Common questions of a metrology

Khramenkov V.N., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation

Ministry of Defense, Nadein V.V., k.p.s., FSBI «MSHC» of the

Ministry of Defense of the Russian Federation

Method of increasing to accuracy of the measurements parameter
under development technical object 3

Bachurin D.P., k.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation

Ministry of Defense, Mikriukov A.N., k.t.s., FSBI «MSHC» of

Russian Federation Ministry of Defense

About the features of military measuring instruments 6

Ivanov Yu.M., k.t.s., JSC «MERA»

Kleymenov Yu.A., d.t.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense
of the Russian Federation

Improvement of the system of the issue of the units of the values
on base of the realization removed bezdemontazhnoy checks

(calibrations) of the facilities of the measurements 10

Nadeina O.V., k.p.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense

of the Russian Federation,

Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense

of the Russian Federation

The new design decisions and ways their efficient using on
modern stage in the field of lazer, optical and optic-physical

technology of the leading enterprise to RUSSIA 15

Measurements of the geometric values

Novikova I. V., FSUE «VNIIFTRI»

Study of the influence of straightness of a linear comparator on the
error of length measurement 19

Kuznetsov A.A., k.t.s., MTRC AF «AFA», Voronezh

The method for iterative regularized estimation of dynamic system
parameters 23

Measurements of the ionizing radiations

Styazhkin V. A., k.t.s., Scientific and technical committee

(Metrological service of the Armed Forces of the Russian

Federation), STC (MS AFRF)

Construction of a mathematical model of the ionizing radiation

field of closed dosimetric installations of the upd-inter type 32

Information

15-th All Russian Scientific and Technical Conference

(November, 20–22, 2024) 37

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА METHOD OF INCREASING TO ACCURACY OF THE MEASUREMENTS PARAMETER UNDER DEVELOPMENT TECHNICAL OBJECT

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

Надеин В.В., к.п.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,

Khramenkov V.N., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense, Nadein V.V., k.p.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation

E-mail: 32gnii@mail.ru, tel. +7(495) 586-23-88

Nadein_vl@mail.ru; tel. 8(906)751-52-66;

Аннотация: проведен анализ обязательных метрологических требований к измерениям параметров разрабатываемого технического объекта, рассмотрен метод повышения точности измерений параметров объекта, основанный на учете взаимозависимости его измеряемых параметров

The Abstract: is organized analysis of the obligatory metrological requirements to measurements parameter under development technical object, is considered method of increasing to accuracy of the measurements parameter object, founded on account of the interdependences his(its) measured of the parameter

Ключевые слова: разрабатываемый технический объект, обязательные метрологические требования, измерения, взаимозависимые параметры.

Keywords: under development technical object, obligatory metrological requirements, measurements, interdependent parameters.

Обязательные метрологические требования к измерениям параметров разрабатываемого технического объекта, средствам измерений, используемых при измерениях его параметров, и обеспечению единства и достоверности измерений, устанавливаются в соответствии с [1] нормативными правовыми актами Российской Федерации в области обеспечения единства измерений. Для оценки выполнения обязательных метрологических требований к разрабатываемому объекту, заданных заказчиком согласно [2] в техническом задании на его разработку, они должны быть установлены разработчиком объекта в его технической документации. Оценка правильности обоснования требуемой погрешности измерений параметров разрабатываемого объекта проводится по следующим метрологическим показателям объекта:

- погрешности измерений каждого параметра разрабатываемого объекта в целях оценки его соответствия установленным обязательным метрологическим требованиям;
- погрешности измерений каждого параметра разрабатываемого объекта в целях как оценки его соответствия установленным обязательным метрологическим требованиям, так и управления применением объекта по назначению;
- погрешности измерений каждого параметра разрабатываемого объекта в целях управления применением объекта по назначению;

– погрешности измерений каждого параметра разрабатываемого объекта в целях измерений неинформативных величин, влияющих на точность измерений параметров объекта.

Измерения параметров объекта проводятся с применением методик их измерений. При этом измерения параметров разрабатываемого объекта, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны выполняться согласно [1] по аттестованным методикам измерений, за исключением методик измерений, предназначенных для выполнения прямых измерений. Методики прямых измерений параметров разрабатываемого объекта приводятся в эксплуатационной документации на средства измерений объекта. Подтверждение соответствия этих методик измерений обязательным метрологическим требованиям к измерениям осуществляется при утверждении типа средства измерений, применяемого в методике измерений.

В соответствии с [3] методики измерений должны применяться для измерения величин, количественные значения которых выражаются в соответствии с допущенными к применению в Российской Федерации единицами данных величин или шкалами данных величин. До внедрения в практику аттестованной методики измерений параметров разрабатываемого объекта должно

проводиться согласно [3] подтверждения ее соответствия по следующим показателям:

- точности измерений, предъявляемым к измерениям параметров разрабатываемого объекта;
 - условиям при выполнении измерений параметров разрабатываемого объекта;
 - применяемому методу измерений и показателям точности измерений установленным обязательным метрологическим требованиям к измерениям;
 - используемым в методике измерений средств измерений утвержденных типов условиям обеспечения прослеживаемости результатов измерений к государственным первичным эталонам единиц величин;
 - записям результатов измерений, полученных в методике измерений, требованиям к единицам величин, шкалам величин (шкалам измерений), допущенным к применению в Российской Федерации;
 - формам представления результатов измерений, реализованных в методике измерений, обязательным метрологическим требованиям к измерениям;
 - получаемым в методике измерений значениям показателей точности измерений при оценке результатов измерений требованиям нормативных документов.
- При разработке методики измерений параметров объекта проводятся в соответствии с [4] обоснование и установление обязательных метрологических требований к:
- методам измерений параметров разрабатываемого объекта;
 - динамическим, частотным диапазонам и диапазонам значений других неинформативных параметров, влияющим на точность измерений параметров объекта;
 - диапазонам скоростей изменения измеряемых параметров разрабатываемого объекта;
 - показателям точности измерений и их количественным значениям;
 - средствам измерений параметров разрабатываемого объекта, стандартным образцам и измерительным системам (измерительным каналам), измеряемых параметры разрабатываемого объекта;
 - условиям выполнения измерений, влияющим на точность измерений параметров разрабатываемого объекта;

– квалификации специалистов, выполняющих измерения параметров разрабатываемого объекта;

– программному обеспечению при проведении измерений параметров разрабатываемого объекта.

Требования к точности измерений параметров разрабатываемого объекта в методиках измерений устанавливаются согласно [3] с учетом следующих составляющих погрешности, существенно влияющих на результаты измерений:

- инструментальных погрешностей, определяемых метрологическими характеристиками средств измерений и стандартных образцов, в том числе динамическими погрешностями средств измерений;
- методических погрешностей, определяемых техническими характеристиками разрабатываемых объектов;
- погрешностей, связанных с реальными условиями выполнения измерений параметров разрабатываемого объекта, влияющими на результаты измерений.

При расчете характеристик суммарной погрешности измерений параметров разрабатываемого объекта при разработке методик измерений должны учитываться:

- метрологические характеристики средств измерений, установленные в соответствии с [5] в их эксплуатационной документации при утверждении их типа;
- характеристики разрабатываемого объекта, влияющие на точность измерений его параметров;
- характеристики внешних условий выполнения измерений, влияющих на точность измерений параметров разрабатываемого объекта.

Однако из анализа приведенных в [3] составляющих суммарной погрешности измерений параметра разрабатываемого объекта следует, что они не всегда могут быть реализованы применяемыми в методике измерений параметров объекта средствами измерений, имеющими разные интервалы между поверками, не удовлетворяющими требованиям к объекту по своим массогабаритным и надежностным характеристикам, условиям эксплуатации и др.

В связи с этим в статье рассмотрен метод повышения точности измерений параметров разрабатываемого объекта на основе использования корреляционных связей между его измеряемыми параметрами, предложенный в [6]. Практика проведения измерений параметров объектов различ-

ных классов свидетельствует о наличии значительных корреляционных связей между измеряемыми параметрами объекта. Еще большая взаимосвязь, как показано в [7], существует между оцениваемыми при поверке метрологическими характеристиками средств измерений. Поэтому для повышения точности измерений параметров объекта можно, как показано в [6, 7], использовать статистические связи между его измеряемыми параметрами.

Уточненная оценка параметра объекта x_i по известным измеренным значениям n его параметров $y_1, y_2, \dots, y_n$ определяется по формуле [6]:

$$x_i = M_{x_i} - \sum_{p=1}^n \frac{K_{x_i y_p}}{K_{y_p y_p}} (y_p - M_{y_p} - M_{z_p}), \quad (1)$$

где:

x_i – уточненная оценка параметра по известным измеренным значениям n параметров объекта $y_1, y_2, \dots, y_n$;

M_{x_i} – математическое ожидание i -го параметра разрабатываемого технического объекта;

M_{z_p} – значение систематической погрешности средства измерений, измеряющего p -й параметр объекта;

$Kx_i x_i$, $Kx_i y_p$ – алгебраические дополнения элементов $h_{x_i x_i}$ и $h_{x_i y_p}$ ковариационной матрицы K системы $(x_p, y_1, y_2, \dots, y_n)$, приведенной в формуле (2).

$$K = \begin{pmatrix} h_{x_i x_i} & h_{x_i y_1} & h_{x_i y_2} & \dots & h_{x_i y_n} \\ h_{y_1 x_i} & h_{y_1 y_1} & h_{y_1 y_2} & \dots & h_{y_1 y_n} \\ h_{y_2 x_i} & h_{y_2 y_1} & h_{y_2 y_2} & \dots & h_{y_2 y_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{y_n x_i} & h_{y_n y_1} & h_{y_n y_2} & \dots & h_{y_n y_n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Дисперсия уточненного значения i -го параметра объекта определяется в соответствии с выражением (3) по формуле:

$$D[x_i / y_1, y_2, \dots, y_n] = K / K_{x_i x_i} \quad (3)$$

Как показано в [6], для получения уточненной оценки параметра x_i разрабатываемого объекта необходимы количественные значения элементов ковариационной матрицы объекта. В большинстве случаев элементы ковариационной матрицы (2)

носят случайный характер, поскольку они определяются в основном статистическим путем. В связи с этим необходимо установить верхнюю границу погрешности определения значений элементов ковариационной матрицы, при которой еще имеет смысл проводить оценку параметра объекта x_i с учетом результатов измерений остальных $(n - 1)$ параметров. Очевидно, учет корреляционных зависимостей для повышения точности измерений параметров объекта целесообразно использовать только в том случае, когда выполняется условие (4):

$$D[x_i / y_1, y_2, \dots, y_n] < D[x_i / y_1]. \quad (4)$$

Как показано в [7], дисперсия $D[x_i / y_1]$ определяется по формуле (5)

$$D[x_i / y_i] = \frac{\sigma_{z_i}^2 \sigma_{x_i}^2}{\sigma_{z_i}^2 + \sigma_{x_i}^2}, \quad (5)$$

где $\sigma_{z_i}^2$ – дисперсия погрешности измерения i -го параметра разрабатываемого объекта; $\sigma_{x_i}^2$ – дисперсия результата измерения i -го параметра разрабатываемого объекта.

Литература:

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями от 14 февраля 2024 г. № 18-ФЗ)..
2. ГОСТ 15.016–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению.
3. Приказ МПТ России от 15.12.2015 г. № 4091.
4. Порядок аттестации первичных референтных методик (методов) измерений, референтных методик (методов) измерений и методик (методов) их применения.
5. ГОСТ Р 8.563–2009. ГСИ. Методики (методы) измерений.
6. ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
7. Сычев Е.И., Томилев Ю.Ф., Храменков В.Н. Планирование метрологического обеспечения технических систем. – Архангельск, изд-во АГТУ, 1998, 288 с.
8. Тарасов Д.Ю., Храменков А.В. Применение качества технологического процесса предприятия при выпуске массовой продукции. // Вестник метролога, 2022, № 1, стр. 13–16.
9. Храменков В.Н. Метод выявления значимых погрешностей при измерениях взаимозависимых параметров. // Измерительная техника, 1987, № 9. – с. 14–15.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ABOUT THE FEATURES OF MILITARY MEASURING INSTRUMENTS

Бачурин Д.П., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Bachurin D.P., k.t.s., Federal State Budgetary Institution «Metrology Scientific Head Center»
Russian Federation Ministry of Defense;
тел. 8(495)586-25-77
Dbach1@yandex.ru

Микрюков А.Н., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Mikriukov A.N., k.t.s., Federal State Budgetary Institution «Metrology Scientific Head Center»
Russian Federation Ministry of Defense;
тел. 8(495)586-84-40
32gnii@mil.ru

Аннотация: проведен анализ особенностей средств измерений военного назначения, их испытаний в целях утверждения типа, утверждения типа. Разработаны предложения по порядку ведения федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений в части средств измерений военного назначения

The Abstract: an analysis of the features of military measuring instruments and their testing for the purpose of type approval and type approval was carried out. Proposals have been developed for the procedure for maintaining the federal information fund to ensure the uniformity of measurements in terms of military measuring instruments

Ключевые слова: Средства измерений военного назначения, испытания

Keywords: military measuring instruments, testing

Техническую основу обеспечения единства измерений в Вооруженных Силах Российской Федерации (далее – Вооруженные Силы), других войсках, воинских формированиях и органах образуют военные эталоны единиц величин, прослеживаемые к государственным первичным эталонам единиц величин, эталоны-переносчики, рабочие эталоны единиц величин и мобильные метрологические комплексы различного назначения, а также стандартные образцы, средства измерений военного и специального назначения (далее – СИ ВН) и вспомогательное оборудование, используемые для решения задач обеспечения единства измерений [1]. Самую значительную часть технической основы, как по номенклатуре, так и по количеству, составляют СИ ВН. К средствам измерений военного назначения относятся средства измерений, применяемые для комплектации вооружения, военной и специальной техники (далее – ВВСТ) и (или) для измерений в Вооруженных Силах Российской Федерации [1].

В сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, действие которой распространяется на осуществление деятельности в области обороны и безопасности государства, допускается применение СИ утвержденного типа, прошедших поверку [6].

С учетом специфики разработки, производства и последующей эксплуатации, СИ ВН имеют ряд

особенностей относительно СИ, применяемых в гражданской сфере. К таким особенностям можно отнести:

- разработку и изготовление средств измерений под контролем военных представителей с использованием комплектующих изделий, разрешённых к применению в Минобороны России;
- обеспечение требуемой надежности СИ ВН, обеспечивающей требуемые интервалы между поверками;
- требования документов по стандартизации оборонной продукции, являющиеся обязательными для СИ ВН, поскольку они являются образцами военной техники.

Кроме того, следует упомянуть особенности закупки СИ ВН для комплектации образцов ВВСТ и поставки в Вооруженные Силы, связанных с выполнением требований Минобороны России к закупаемым изделиям.

Данные особенности СИ ВН необходимо учитывать, прежде всего, при проведении испытаний средств измерений в целях утверждения типа (далее – ИЦУТ), утверждении типа СИ ВН. Особенности ИЦУТ СИ ВН и утверждения их типа учтены в приказе Минобороны России 2016 года № 402 [9]. Однако, ввиду имеющихся и планируемых изменений руководящих документов по обеспечению единства измерений в Российской Федерации, назрела необходимость в переработке указанного документа.

Так, поступивший проект приказа Минпромторга России, регламентирующий порядок ИЦУТ и утверждения типа средств измерений, в том числе и СИ ВН (Проект) [11], прошедший необходимые процедуры согласований с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти, предполагает изменения объема испытаний и порядка утверждения типа.

1. Одной из основных характеристик СИ ВН, характеризующей их метрологическую надежность, является значение интервала между поверками (далее – ИМП). В соответствии с действующими руководящими документами, определение значения ИМП осуществляется на основании значений характеристик надежности СИ ВН, либо по результатам интервалов между поверками аналогичных средств измерений. Определение значений характеристик надёжности СИ ВН, в подавляющем большинстве случаев проводится на основании расчетов надежности, представляемых производителем СИ ВН. Помимо расчетных методов, в ряде случаев проводятся также испытания на надежность.

Применяемые расчетные методы основаны на построении схемы надежности. При этом, основным условием корректности применения данных методов является наличие априорной информации о характеристиках надежности элементов, входящих в состав СИ ВН. С учетом сказанного, в Проекте предусмотрено определение характеристик метрологической надежности проводить по результатам натурных испытаний с применением согласованных Росстандартом методик. Применение расчетных методов не предусмотрено, поскольку зачастую при разработке и изготовлении СИ производственно-технического назначения значения надежности характеристики применяемой электронной компонентной базы достоверно не известны.

В то же время, **особенностями** СИ ВН является то, что их разработка и производство осуществляются под контролем военных представителей из элементов, согласованных Минобороны России с известными значениями эксплуатационных и технических характеристик. При этом, интервалы между поверками СИ ВН должны быть увязаны с интервалами технического обслуживания образцов ВВСТ, в состав которых они входят.

Таким образом, для определения надёжных характеристик СИ ВН, разрабатываемых и выпускаемых в рамках государственного оборонного заказа, применение расчетных методов является обоснованным. В случае отнесения к СИ ВН гра-

жданских средств измерений, может потребоваться проведение их натурных испытаний на надежность. При этом согласование программ и методик таких испытаний с Росстандартом является избыточным и не всегда возможным, поскольку в ряде случаев значения характеристик применяемого испытательного оборудования Минобороны России подпадают под требования законодательства о защите государственной тайны.

2. В соответствии с действующими нормативными документами [2, 3] ИМП устанавливается в ходе испытаний в целях утверждения типа СИ. Поскольку ИМП является одной из основных характеристик, в настоящее время корректировка ИМП проводится по результатам ИЦУТ. Проектом предусмотрен порядок корректировки ИМП в сторону уменьшения их значений.

Второй **особенностью** СИ ВН является организация их производства и эксплуатации. Ряд средств измерений имеет достаточно существенный срок их эксплуатации и производства. Так, некоторые типы СИ ВН, например, такие как СИ температуры, давления, вакуума, электроизмерительные приборы, штангенинструмент, выпускаются по одним и тем же техническим условиям более 20 лет, а срок их эксплуатации может составлять, в ряде случаев 20, 30 и более лет. Это позволяет, в свою очередь, накопить достаточно большой статистический материал о надежности конкретного типа средств измерений и определить достаточно точно надежность характеристики СИ ВН и, как следствие, интервалы между поверками.

Еще одной **особенностью** СИ ВН является то, что ряд средств измерений, входящих в состав ВВСТ, применяются по назначению достаточно редко и, в основном, находятся на хранении. К таким средствам измерений можно отнести, например, средства измерений, заложенные в ЗИП и применяемые при контроле параметров ВВСТ при различных видах технического обслуживания. При этом периодичность применения таких СИ ВН может быть больше интервалов между поверками. Иными словами, средство измерений поверяется, но по назначению не используется. Такие средства измерений целесообразно поверять непосредственно перед их применением по назначению.

3. Опыт работы Росстандарта с зарубежными изготовителями СИ показал, что требования по предоставлению заявителями ИЦУТ СИ эксплуатационной документации, выполненной в соответствии с национальными стандартами Российской Феде-

рации, в большинстве случаев не представляется возможным. В этой связи Проектом предусмотрено представление на ИЦУТ комплекта технических документов на СИ, причем данное правило действует как на зарубежные, так и на отечественные средства измерений.

В соответствии с действующими нормативными правовыми документами по стандартизации оборонной продукции [7, 8] документы по стандартизации обороной продукции являются обязательными к исполнению на всех стадиях жизненного цикла ВВСТ, в том числе СИ ВН, относимых к военной технике. Таким образом, на ИЦУТ СИ ВН должен предоставляться комплект эксплуатационной документации, выполненный в соответствии с документами по стандартизации оборонной продукции, что является еще одной **особенностью СИ ВН**.

4. В соответствии с особенностями обеспечения единства измерений при осуществлении деятельности в области обороны и безопасности Российской Федерации [1] к СИ ВН относятся средства измерений, применяемые для комплектации ВВСТ и (или) для измерений в Вооруженных Силах. То есть, к СИ ВН могут быть отнесены и средства измерений общепромышленного назначения, которые не разрабатывались для нужд Минобороны России. Закупка и применение таких СИ в интересах Минобороны России может быть проведена в случае обеспечения соответствия характеристик СИ требованиям Минобороны России, предъявляемым к данным СИ. Например, при комплектации ВВСТ необходимо учитывать не только обеспечение соответствия диапазонов и погрешностей СИ измерительной задаче, но и условий эксплуатации, стойкости к воздействию различных внешних воздействующих факторов, ИМП СИ интервалам технического обслуживания образца, надежность характеристики, возможности поверки в Вооруженных Силах и другие факторы. Такую экспертизу проводит ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России в рамках определения возможности применения СИ, отсутствующих в ограничительном перечне СИ ВН, разрешенных для комплектации ВВСТ [10], а также при экспертизе материалов испытаний СИ, проводимой для включения СИ в раздел Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений в области обороны и безопасности государства (далее – раздел ФИФ МО), что также является **особенностью СИ ВН**.

5. Действующими руководящими документами [2, 5] предусмотрено проведение экспертизы ре-

зультатов ИЦУТ с выдачей заключения по проверке результатов испытаний. В случае утверждения типа гражданских средств измерений такую экспертизу проводит ФГБУ «ВНИИМС» [5]. Особенности процедуры утверждения типа СИ ВН является то, что для СИ ВН такую экспертизу проводит ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России [1, 9], после чего направляет заявление на утверждение (внесение изменений в сведения об утвержденном типе) типа СИ ВН в Росстандарт.

Проблемным вопросом, нормативно не решенным в настоящее время, является отсутствие правил взаимного обмена информацией, содержащейся в Федеральном информационном фонде (ФИФ). Так, в соответствии с действующими документами [6, 3] установлено, что:

раздел ФИФ МО является составной частью ФИФ; в соответствии [1, 4] оператора раздела ФИФ МО, организацию и ведение раздела ФИФ МО определяет Министерство обороны Российской Федерации; ведение ФИФ в целом, включая предоставление содержащихся в нем документов и сведений, организует Росстандарт, а конкретно – подведомственный Росстандарту государственный научный метрологический институт (далее – оператор Фонда).

Ведение общедоступной части ФИФ в настоящее время осуществляется с использованием Федеральной государственной информационной системы «АРШИН» (ФГИС «АРШИН»), что сделало возможным использование информационных ресурсов фонда всеми заинтересованными лицами посредством сети Интернет. Получить доступ к информации ФИФ при помощи ФГИС «АРШИН» может любой желающий, подключенный к сети Интернет, что значительно упрощает выполнение требований законодательства об обеспечении единства измерений, например, при внесении сведений о результатах поверки [6, 3]. В то же время, наличие полной информации о всех типах СИ и эталонах, их характеристиках, изготовителях, результатах поверки, владельцах в условиях жесткой санкционной политики со стороны недружественных Российской Федерации стран создаёт серьезные угрозы информационной безопасности.

В этой связи, в соответствии с [1, 4] в Минобороны России оператором раздела ФИФ МО определен ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России. Информация из раздела ФИФ отсутствует в общем доступе и распространяется по запросу. Это, в свою очередь, создаёт проблемные вопросы при проведении поверки СИ ВН, выполняемой в интересах Минобороны

России и организаций ОПК, аккредитованными в национальной системе аккредитации организациями. Они не могут удостовериться, что тип поверяемого СИ утвержден, не могут внести сведения о результатах поверки в ФИФ. В целях решения данных проблемных вопросов ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России в настоящее время вносит сведения о поверке СИ ВН, выполненных сторонними организациями, не относящимися к Минобороны России, что нигде не оговорено нормативно и выполняется на «устных договоренностях». Несмотря на это, проблема оперативного доступа к сведениям раздела ФИФ МО, с учетом его закрытости, в настоящий момент не решена. Решение указанной проблемы возможно выполнить двумя путями:

1. Внести изменения в приказ Минпромторга 2016 г. № 958. При этом определить порядок информационного взаимодействия между общедоступной частью и разделом ФИФ МО, включая объем и сроки включения информации из раздела ФИФ МО в общедоступную часть ФИФ.

2. Передать ведение раздела ФИФ МО Росстандарту в части сведений об утвержденных типах СИ ВН и результатах их поверки, выполненной организациями, аккредитованными Росаккредитацией. При этом, необходимо установить перечень публикуемых и не публикуемых сведений.

Вышеперечисленные особенности СИ ВН целесообразно положить в основу межведомственного нормативно-правового документа, разрабатываемого Минобороны России, взамен действующего приказа Минобороны России 2016 года № 402 [9].

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 02.10.2009 № 780 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 03.06.2017 № 677 от 30.11.2022 № 2174) «Об особенностях обеспечения единства измерений при осуществлении деятельности в области обороны и безопасности Российской Федерации».

2. Приказ Минпромторга России от 28.08.2020 № 2905 (ред. от 12.08.2022) «Об утверждении порядка проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа, порядка утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений, внесения изменений в сведения о них, порядка выдачи сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, формы сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, требований к знакам утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений и порядка их нанесе-

ния» (Зарегистрировано в Минюсте России 20.11.2020 № 61034).

3. Приказ Минпромторга России от 28.08.2020 № 2907 «Об утверждении порядка установления и изменения интервала между поверками средств измерений, порядка установления, отмены методик поверки и внесения изменений в них, требований к методикам поверки средств измерений» (Зарегистрировано в Минюсте России 23.10.2020 № 60544).

4. Приказ Минпромторга России от 30.03.2016 № 958 «Об утверждении особенностей организации и ведения разделов федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений в области обороны и безопасности государства» (Зарегистрировано в Минюсте России 05.12.2016 № 44563).

5. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12.11.2018 № 2346 «Об утверждении административного регламента по предоставлению федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии государственной услуги по утверждению типа стандартных образцов или типа средств измерений» (Зарегистрировано в Минюсте России 08.02.2019 № 53732).

6. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ.

7. Федеральный закон «О стандартизации в Российской Федерации» от 29.06.2015 № 162-ФЗ.

8. Постановление Правительства Российской Федерации от 30.12.2016 № 1567 «О порядке стандартизации в отношении оборонной продукции (товаров, работ, услуг) по государственному оборонному заказу, продукции, используемой в целях защиты сведений, составляющих государственную тайну или относимых к охраняемой в соответствии с законодательством Российской Федерации иной информации ограниченного доступа, продукции, сведения о которой составляют государственную тайну, а также процессов и иных объектов стандартизации, связанных с такой продукцией».

9. Приказ Министра обороны Российской Федерации от 02.07.2016 № 402 «Об особенностях отнесения технических средств к средствам измерений военного назначения в целях утверждения типа и порядка утверждения типа»

10. Приказ заместителя Министра обороны Российской Федерации от 23.12.2021 № 1075дсп «Об утверждении Перечня средств измерений военного назначения для комплектации вооружения, военной и специальной техники в Министерстве обороны Российской Федерации».

11. <https://regulation.gov.ru/Regulation/Npa/PublicView?npaID=137271> О внесении изменений в Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 28 августа 2020 г. № 2905/

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ УДАЛЕННОЙ БЕЗДЕМОНТАЖНОЙ ПОВЕРКИ (КАЛИБРОВКИ) СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ IMPROVEMENT OF THE SYSTEM OF THE ISSUE OF THE UNITS OF THE VALUES ON BASE OF THE REALIZATION REMOVED BEZDEMONTAZHNOY CHECKS (CALIBRATIONS) OF THE FACILITIES OF THE MEASUREMENTS

Иванов Ю.М., к.т.н., АО «МЕРА»
Ivanov Yu.M., Candidate of Technical Sciences, JSC «MERA»
tel.(812) 369–88–38, e-mail: mail@mera.spb.ru
Клейменов Ю.А., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Kleymentov Yu.A., Doctor of Technical Sciences, FSBI «MSHC» RFMD
tel.(495) 586–23–88, e-mail: 32gnii@mil.ru

Аннотация: рассмотрены актуальность и особенности реализации процедур поверки и калибровки средств измерений без их демонтажа с мест эксплуатации с использованием цифрового носителя эталонного сигнала единицы величины.

The Abstract: the relevance and features of the implementation of procedures for verification and calibration of measuring instruments without their dismantling from the places of operation using a digital carrier of the reference signal of a unit of magnitude are considered.

Ключевые слова: бездемонтажная поверка, электроизмерительные приборы, носитель эталонного сигнала единицы величины.

Keywords: non-dismountable verification, electrical measuring devices, a carrier of a reference signal of a unit of magnitude

Цели опережающего технологического развития страны требуют от специалистов-метрологов разработки и внедрения в практику метрологического обеспечения (МлО) инновационных решений, обеспечивающих его максимальную эффективность в координатах «время-деньги».

Поверка и калибровка средств измерений (СИ) являются важнейшими метрологическими процедурами, обеспечивающими единство и требуемую точность результатов измерений параметров продукции различного назначения, окружающей среды и любых других объектов измерений, порядков организации и выполнения которых определяется Федеральным законом [1].

Процедуры поверки и калибровки (далее – поверка) СИ, реализуемые в поверочных органах, являются затратными, как по материально-техническому обеспечению, так и по времени их выполнения. Кроме того, они предполагают необходимость демонтажа встроенных в изделия СИ с мест их эксплуатации, следствием чего является временная неработоспособность этих изделий. Примером этого, в частности, являются традиционные способы поверки электроизмерительных приборов, в которых передача единицы величины от рабочего эталона (РЭ) поверяемому СИ осуществляется путем не-

посредственного подключения РЭ, находящегося в стационарной или подвижной метрологической лаборатории, к поверяемому СИ (например, методика поверки вольтметра универсального цифрового быстродействующего В7–43, приведенная в его инструкции по эксплуатации [2]).

Принципиальным и весьма актуальным решением проблемы снижения указанных затрат является поверка СИ без их демонтажа с мест эксплуатации, т.е. бездемонтажная поверка.

Существующие способы бездемонтажной поверки СИ реализуют, главным образом, схемы удаленного доступа, построенные на базе «клиент-серверной» архитектуры с использованием соответствующего специального программного обеспечения (СПО).

Общей особенностью таких способов является нахождение РЭ на некотором расстоянии от поверяемого СИ, т.е. отсутствует их электрическое соединение для передачи единицы величины. При этом рабочее место клиента включает в себя поверяемое СИ и персональный компьютер (ПК) с клиентской частью программы. На стороне сервера находятся РЭ и ПК с серверной частью программы.

Известны способы дистанционной калибровки для оценки текущих значений метрологических ха-

рактических СИ [3–6], которые с некоторыми различиями описывают блок-схему калибровки на основе обмена по телекоммуникационному каналу связи командами и измерительной информацией между субъектами реализации процедур калибровки.

Интерес к решению проблемы бездемонтажной поверки СИ и ее метрологическим особенностям также подчеркивается авторами работы [7].

В январе 2020 года Росстандартом была утверждена Программа применения технологий удаленного доступа для снижения затрат времени и средств на оказание услуг в области обеспечения единства измерений [8], в которой предусмотрен комплекс мероприятий по разработке методов и средств реализации элементов бездемонтажной поверки с применением цифровых технологий удаленного доступа. Техническая реализация методов и средств, предусмотренных Программой, принципиально не отличается от известных и также базируется на «клиент-серверной» архитектуре (рисунок 1).

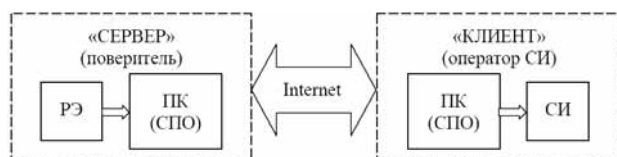


Рисунок 1 – Блок-схема процедуры поверки СИ на основе «клиент-серверной» архитектуры

Анализ имеющегося технического задела в области разработки способов поверки СИ, реализуемых на основе удаленного доступа по схеме «клиент-серверной» архитектуры, позволил выявить ряд проблемных вопросов и определить направления дальнейшего совершенствования системы передачи единиц величин.

Основными недостатками описанных в [3–6] способов, а также способов, предусмотренных к разработке в соответствии с Программой [8], являются следующие их особенности:

реализация способов предусматривает наличие дополнительного оборудования в виде персональных компьютеров со специальным программным обеспечением, устанавливаемых как на стороне «клиента» (поверяемое СИ), так и на стороне «сервера» (РЭ);

связь между «клиентом» и «сервером» осуществляется по общепользовательской сети Internet,

которая не везде может быть доступна и помехоустойчива.

Для исключения указанных недостатков в АО «МЕРА» разработано и запатентовано перспективное научно-техническое решение [9]. Получаемый при его реализации технический результат состоит в передаче единицы величины от РЭ поверяемому СИ посредством носителя оцифрованных эталонных сигналов единицы величины (ЭСЕВ) с максимальным упрощением процедуры поверки за счет отказа от непосредственного использования в процессе поверки СИ рабочего эталона (например, калибратора), дополнительного оборудования и помехоустойчивых общепользовательских каналов связи. Блок-схема реализации предложенного способа [9] приведена на рисунке 2.

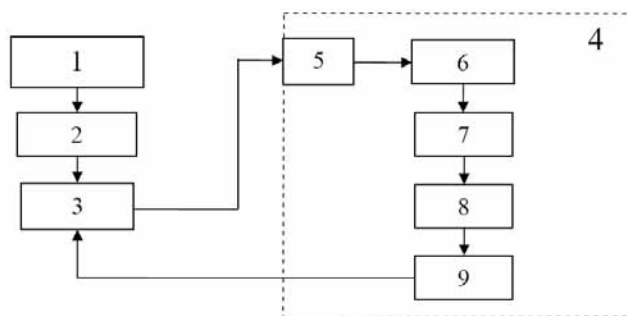


Рисунок 2 – Блок-схема реализации предложенного способа поверки СИ:

- 1 – РЭ; 2 – носитель ЭСЕВ; 3 – поверитель;
- 4 – поверяемое СИ;
- 5 – разъем для подключения носителя ЭСЕВ;
- 6 – встроенный в СИ цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП);
- 7 – электрическая схема СИ;
- 8 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- 9 – оцифрованный протокол поверки

Указанный результат достигается тем, что передача единицы величины от РЭ осуществляется последовательным выполнением ряда операций, алгоритм которых приведен на рисунке 3.

Для реализации предложенного способа поверки изготовитель РЭ предварительно выполняет процедуру оцифровки воспроизводимого ЭСЕВ в установленных диапазонах амплитуды и частоты на носитель информации и высылает его потребителю по запросу для включения в базу данных метрологической службы или

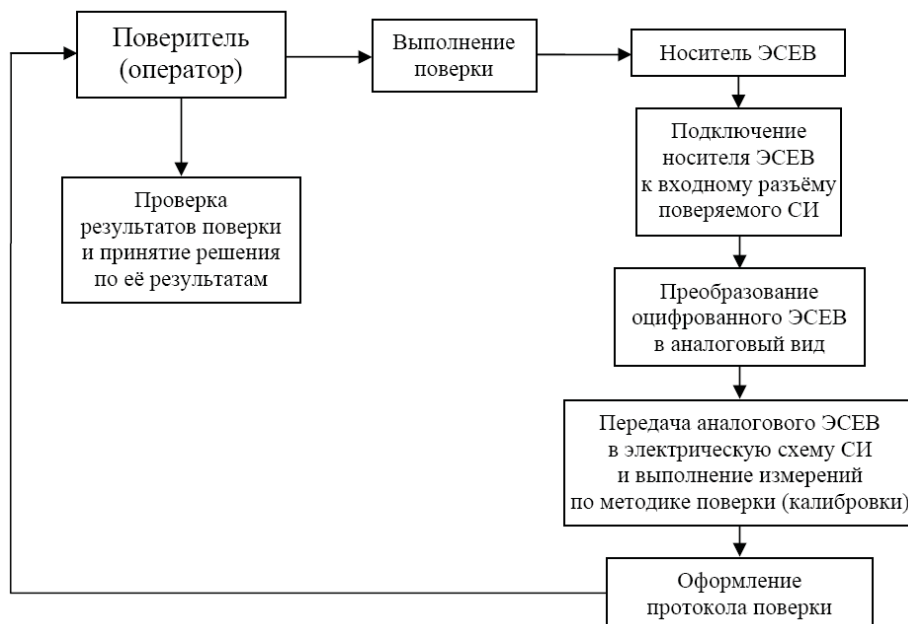


Рисунок 3 – Алгоритм осуществления способа

внесения в комплект поставки СИ в качестве приложения к методике поверки. При этом выполняются необходимые процедуры защиты информации, записанной на носитель, от несанкционированных с ним действий (фиксируются контрольные суммы записанных файлов информации).

Ключевым элементом блок-схемы и алгоритма реализации предложенного способа является носитель ЭСЕВ, который выполняет функции РЭ в части хранения и воспроизведения единицы величины.

Носитель ЭСЕВ сопровождается паспортом, в котором указываются:

- контрольные суммы файлов оцифрованных сигналов;

- погрешность воспроизведения ЭСЕВ с учетом его АЦП-преобразования (определяется при записи на носитель);

- требования по разрядности ЦАП, встроенного в поверяемое СИ;

- суммарная погрешность ЭСЕВ с учетом его ЦАП-преобразования (определяется при опробовании методики поверки).

При необходимости выполнения поверки оператор, после проверки носителя ЭСЕВ на отсутствие несанкционированных воздействий (проверка контрольных сумм записанных файлов),

подключает его к выделенному для этой цели разъему на корпусе поверяемого СИ.

СИ переводится в режим «Поверка». Далее оцифрованные ЭСЕВ преобразуются схемой ЦАП, встроенного в СИ, в аналоговые сигналы и подаются в его измерительную электрическую схему, после чего по алгоритмам встроенного программного обеспечения в автоматическом режиме выполняется проверка соответствия его нормированных метрологических характеристик установленным требованиям.

По окончании проверки метрологических характеристик СИ автоматически оформляется протокол результатов поверки, который в оцифрованном виде направляется поверителю для принятия решения по результатам проведенной поверки прибора.

Очевидно, что в целях выполнения изложенных операций поверки разработчиком СИ должны быть предварительно предусмотрены и реализованы следующие мероприятия и научно-технические решения:

- СИ выполняется с цифровой обработкой измерительной информации;

- в СИ должен быть предусмотрен специальный вход для подключения носителя ЭСЕВ;

- в СИ встраивается ЦАП для преобразования оцифрованного ЭСЕВ в аналоговый сигнал с по-

следующей передачей его в электрическую схему прибора;

программное обеспечение СИ включает в себя процедуру оцифровки результатов проверки метрологических характеристик с автоматической выдачей протокола поверки;

в комплект поставки СИ может включаться носитель ЭСЕВ с установленными диапазонами амплитуды и частоты воспроизводимого ЭСЕВ, указанными в методике поверки.

Погрешность способа в целом определяется погрешностью передачи ЭСЕВ поверяемому СИ, в процессе которой осуществляется АЦП-преобразование при его оцифровке для записи на носитель и ЦАП-преобразования при передаче этого сигнала на измерительную схему СИ. Однако если учесть, что погрешность АЦП-преобразования электрического сигнала существенно меньше, чем его ЦАП-преобразования, погрешность способа практически будет определяться только величиной погрешности ЦАП-преобразования сигнала.

Экспериментальная оценка погрешности предложенного способа проводилась в нормальных условиях для ЦАП-преобразования ЭСЕВ различных значений напряжения постоянного и переменного тока (рисунок 4).

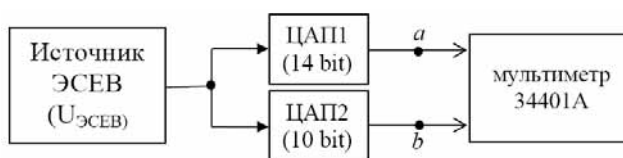


Рисунок 4 – Схема экспериментальной оценки погрешности предложенного способа

Для оценки погрешности и ее зависимости от разрядности применяемой схемы ЦАП-преобразования в качестве ЦАП применялись схемы с различной разрядностью: ЦАП1 (14 bit) и ЦАП2 (10 bit).

В качестве контрольного СИ для измерений значений преобразованного ЭСЕВ, подлежащего к передаче на измерительную схему СИ, применялся мультиметр 34401А с нормированной погрешностью измерений.

Результаты оценок погрешностей разных схем ЦАП-преобразования для различных значений напряжения постоянного и переменного тока, полученных в процессе эксперимента, приведены в таблицах 1 и 2. При этом погрешность ЦАП-преобразования определялась как разность между значением заданной величины ЭСЕВ ($U_{\text{ЭСЕВ}}$) и измеренными значениями напряжения U_a и U_b в точках а и b соответственно.

Таблица 1

Оценки погрешностей разных схем ЦАП-преобразования для различных значений напряжения постоянного тока

$U_{\text{ЭСЕВ}}, \text{ мВ}$	ЦАП1 (14 bit)			ЦАП1 (10 bit)		
	$U_a, \text{ мВ}$	D	d	$U_b, \text{ мВ}$	D	d
10	10,021	0,021	0,21	10,485	0,485	4,85
100	100,026	0,026	0,026	100,706	0,706	0,706
1000	1000,45	0,45	0,045	1006,58	6,58	0,658
5000	5000,63	0,63	0,0126	5008,51	8,51	0,1702

Таблица 2

Оценки погрешностей разных схем ЦАП-преобразования для различных значений напряжения переменного тока (для частоты $f = 3 \text{ кГц}$)

$U_{\text{ЭСЕВ}}, \text{ мВ}$	ЦАП1 (14 bit)			ЦАП1 (10 bit)		
	$U_a, \text{ мВ}$	D	d	$U_b, \text{ мВ}$	D	d
10	10,025	0,025	0,25	10,028	0,028	0,28
100	100,036	0,036	0,036	100,054	0,054	0,054
1000	1000,341	0,341	0,0341	1001,733	1,733	0,1733
5000	5002,56	2,56	0,0512	5007,18	7,18	0,1436

Проведенный эксперимент показал, что:

1) погрешность ЦАП-преобразования может вносить существенный вклад в искажение ЭСЕВ, следствием чего является необходимость учета этой погрешности в методике поверки при оценке соответствия нормированных метрологических характеристик СИ, установленным в его паспорте (формуляре);

2) погрешность ЦАП-преобразования уменьшается с увеличением разрядности применяемой схемы ЦАП.

Таким образом, предложенный способ поверки позволяет для перспективных цифровых электроизмерительных СИ устранить недостатки существующей процедуры дистанционной калибровки, упростить ее блок-схему, связанную с привлечением дополнительного оборудования и использованием помехоустойчивых общепользовательских каналов связи, а также решить задачу поверки без непосредственного подключения РЭ к поверяемому СИ.

При этом метрологические службы получают следующие преимущества при организации своей деятельности:

требования к квалификации персонала, участвующего в реализации процедуры поверки, значительно снижаются;

отсутствует необходимость физического наличия в поверочном органе определенных типов РЭ, так как достаточно иметь банк актуализированных и защищенных носителей оцифрованных ЭСЕВ требуемых типов РЭ во всем их динамическом (амплитудном и частотном) диапазоне;

в отдельных случаях возможно создание ЭСЕВ на базе известных математических функций, например, $\sin(x)$, что практически исключает погрешность воспроизведения соответствующей функции единицы величины физическим РЭ;

время выполнения операций, предусмотренных методикой поверки, минимизируется за счет автоматизации процедур встроенным в СИ программным обеспечением (специальный режим работы СИ «Поверка»).

Описанный способ может использоваться при организации и выполнении удаленной бездемонстрационной поверки (калибровки) не только электро-

измерительных приборов, но и любых других СИ, процедуры поверки и калибровки которых основаны на использовании соответствующих ЭСЕВ, имеющих «электрическую» природу, и которые могут быть подвергнуты аналого-цифровому и цифро-аналоговому преобразованиям.

Литература

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
2. Вольтметр универсальный цифровой быстродействующий В7-43. Инструкция по эксплуатации (Tr2.710.026 ИЭ, рис. 6.1–6.7).
3. Толочко Т.К., Гусинский А.В., Кострикин А.М. Дистанционная калибровка средств измерений // Доклады БГУИР. – 2008. – № 1(31). – С. 38–43.
4. Зезюлина Т.К., Гусинский А.В., Кострикин А.М. Разработка и внедрение метода дистанционной калибровки в аккредитованных лабораториях // Доклады БГУИР. – 2010. – № 2(48). – С. 37–42.
5. Величко О.Н., Гуринов Р.В., Баранов П.Ф. // Организация дистанционной калибровки СИ электрических величин // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 5: Информационные технологии. – С. 108–114.
6. Худоногова Л.И. Разработка системы для дистанционной калибровки СИ на основе использования технологических возможностей программной среды LABVIEW // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 4(10). – С. 115–119.
7. Супрунюк В.В., Кувыкин Ю.А., Щедрин А.Ю., Горбачев А.А. О метрологическом самоконтроле измерительных систем // Вестник метролога. – 2023. – № 4. – С. 5–9.
8. Приказ Росстандарта от 16 января 2020 года № 24 «Об утверждении Программы применения технологий удаленного доступа для снижения затрат времени и средств на оказание услуг в области обеспечения единства измерений».
9. Патент РФ 2812229. Способ поверки электроизмерительного прибора // Иванов Ю.М., Клейменов Ю.А. / – Заявл. 17.11.2021. – Опубл. 25.01.2024. – Бюл. № 3.

НОВЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ И СПОСОБЫ ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОЙ, ОПТИЧЕСКОЙ И ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ВЕДУЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ. THE NEW DESIGN DECISIONS AND WAYS THEIR EFFICIENT USING ON MODERN STAGE IN THE FIELD OF LAZER, OPTICAL AND OPTIC-PHYSICAL TECHNOLOGY OF THE LEADING ENTERPRISE TO RUSSIA

Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Руденкова Е. Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Nadeina O.V., k.p.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense
of the Russian Federation,

Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
email:ovnadeina@gmail.com,
tel. +79999989015;
e-mail: L654007@yandex.ru,
tel. 8(985)923-70-72

Аннотация: разработки предприятия, как уже используемые, так и перспективные, неизменно вызывающие интерес у специалистов и других участников рынка лазерно-оптической отрасли, были представлены на выставке «Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2024». Участники увидели самые популярные и передовые устройства собственного производства, играющие сегодня важную роль в модернизации технической инфраструктуры промышленности и науки.

The Abstract: developments of the enterprise, both already used and promising, invariably arousing interest among specialists and other market participants laser-optical industry, were presented at the exhibition “Photonics. World of lasers and optics 2024.” Participants saw the most popular and advanced devices of our own production, which play an important role today role in modernizing the technical infrastructure of industry and sciences.

Ключевые слова: цифровая обработка, искусственный интеллект, излучение, оптический элемент, спутниковая аппаратура, эталон координат местоположения.

Keywords: digital processing, artificial intelligence, radiation, optical element, satellite equipment inertial navigational systems, standard of the coordinates of the location.

Выставка «Фотоника. Мир лазеров и оптики» является самым крупным отраслевым событием в России, ежегодно его посещают около 8000 посетителей. Обширная деловая программа выставки включает в себя официальные заседания, конференции, круглые столы, семинары, презентации. Компании-участницы знакомили посетителей с передовыми технологиями, новыми изобретениями и образцами продукции в области лазерной, оптической и оптоэлектронной техники. Среди участников и посетителей были ФГБУ «ВНИИОФИ», ООО «ФемтоВижн», Российский квантовый центр, Сколковский институт науки и технологий, НИЯУ МИФИ (Москва), ООО «ФИСТЕХ», АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана», ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, ФГБУ «ГНМЦ» МО РФ, ООО НТО «ИРЭ-Полус» и др.

В четырех конференц-залах проходили мероприятия деловой программы по актуальным темам применения и развития фотоники:

1. «Применение нейросетевых методов при обработке сигналов оптико-цифровых дифракци-

онных систем пространственной фильтрации» Р.С. Стариков, НИЯУ МИФИ (Москва)

2 «Обзор новых лазерных излучателей производства ИРЭ-Полус» С.В. Петров, ООО НТО «ИРЭ-Полус»

3 «Метрологические стенды для характеристики и поверки распределенных оптоволоконных датчиков температуры, деформации и акустики (DTS, DTSS, DAS)» И.С. Шелемба, Новосибирский государственный университет

4 «Волоконно-оптические рефрактометры для контроля параметров агрессивных жидкостей и газов» Д.П. Судас, ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

5 «Инфракрасные оптико-электронные приборы для задач экологической и промышленной безопасности» И.Л. Фуфурин, АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана»

6 «Высокоточная запись брэгговских решеток излучением фемтосекундного лазера» О.В. Бутов, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

7 «Фотонный сопроцессор в компактном исполнении (ФИС) для вычислений в нейросети» В.Н. Трещиков, ООО «Т8»

8 «Решетка вертикального ввода-вывода излучения для ФИС на основе метаматериала «глаз мотылька» И.А. Казаков, ООО «ФИСТЕХ»

9 «Алгоритмы для квантовых компьютеров» Е.О. Киктенко, группа «Квантовые информационные технологии», Российский квантовый центр

10 «Современное состояние метрологического обеспечения технологий и продукции фотоники. Деятельность РГ5 в 2023 г., планы на 2024 г.» И.С. Филимонов, ФГБУ «ВНИИОФИ»

11 «Состояние и перспективы метрологического обеспечения параметров импульсных лазеров» А.И. Колпаков, ФГБУ «ВНИИОФИ»

12 «Методы измерений задержек распространения сигнала в оптических усилителях» О.В. Колмогоров, ФГУП «ВНИИФТРИ»

13 «Разработка лидаров для беспилотного транспорта» Г.В. Никандров, ООО «Яндекс Беспилотные Технологии»

14 «NordLase – российская разработка и производство лазеров (гибридные, твердотельные, волоконные) и лазерных систем. Достижения и новинки» Д.В. Саченко, АО «ЛЛС»

15 «Промышленное применение компактных оптических спектрометров на основе плоских дифракционных решеток в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне» В.М. Поляков, А.С. Бобе, С.И. Томашевич, Ю.И. Хатанзейская, Университет ИТМО, ООО «ГК Р-АЭРО», ООО «Геофотоника».

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ») Росстандарта традиционно принимает участие в отраслевой выставке «Фотоника. Мир лазеров и оптики» и в этот раз представил свои акустооптические устройства и разработки. Разработки предприятия, как уже используемые, так и перспективные неизменно вызывают интерес у специалистов и других участников рынка лазерно-оптической отрасли. Были представлены самые популярные и передовые устройства собственного производства, играющие сегодня важную роль в модернизации технической инфраструктуры промышленности и науки», – отметил начальник научно-исследовательского отделения акустооптики и лазерной оптоэлектроники ФГУП «ВНИИФТРИ» Алексей Апрелев.

Начальник отдела метрологического обеспечения перспективных оптических измерительных средств ФГУП «ВНИИФТРИ» Олег Колмогоров в ходе научно-практической конференции XII Конгресса ТП «Фотоника», проходящей в рамках выставки, представил доклад «Методы измерений задержек распространения сигнала в оптических усилителях».

Кроме того на выставке были представлены разработанные и изготавливаемые ФГУП «ВНИИФТРИ» акустооптические частотодвигатели и модуляторы (приборы, широко применяемые в системах обработки информации, коммутационных устройствах, для оснащения научных лабора-



торий и при создании функциональной электроники), а также устройства для управления.

Посетители выставки также увидели демонстрацию разработок ФГУП «ВНИИФТРИ» в сфере контроля качества продукции в действии: спектрофотометрического анализатора красителей ФАСК и оптического индикатора серы в автомобильном топливе «САД».

Одновременно (27-29 марта) ФГУП «ВНИИФТРИ» Росстандарта принял участие в XXVI Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2024». Заместитель генерального директора ФГУП «ВНИИФТРИ» по радиотехническим измерениям **И.М. Малай** выступил ведущим секции «Цифровая обработка сигналов в измерительных системах» [1].

«Цифровизация экономики невозможна без цифровизации сферы обеспечения единства измерений. При этом для создания конкурентоспособной цифровой структуры общества этот процесс должен идти в опережающем темпе. ФГУП «ВНИИФТРИ» является хранителем комплекса эталонов, лежащих в основе любого процесса цифровой трансформации. Мы ведем работы по созданию новых эталонов единиц величин, разработке цифровых методов генерации, управления и обработки сигналов в метрологических системах, а также обеспечению прослеживаемости результатов измерений в новых условиях», – отметил **И.М. Малай**.

В ходе работы на секции «Обработка сигналов в измерительных системах» были представлены доклады, посвященные вопросам разработки и применения новых методов и методик измерения и обработки сигналов в измерительных каналах всех компонентов измерительной системы. Доклад начальника лаборатории измерений радиояростной температуры ФГУП «ВНИИФТРИ» **Михаила Озерова** был отмечен специальным дипломом, как один из лучших докладов конференции.

Вся тематика конференции была разделена на 9 секций по таким направлениям, как: теория сигналов и систем, обработка сигналов в системах коммуникаций, обработка и передача изображений, машинное зрение, искусственный интеллект и робототехника, обработка сигналов в радиотехнических системах и др.

Материалы публикуются обществом IEEE с индексацией в Scopus и обществом РНТОРЭС им.

А.С. Попова с размещением в eLibrary и индексацией в РИНЦ.

Международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA» проводится ежегодно с 1998 года и отвечает целям и задачам консолидации и поддержки отечественных ученых и специалистов, работающих в области передовых информационных технологий реального времени, расширения международных научных связей и содействия внедрению высоких наукоемких технологий XXI века.

Искусственный интеллект (ИИ) в последнее время активно применяется во всех сферах промышленности. ИИ – это программа, которая принимает последовательность данных и анализирует их, это набор методов, способных систематизировать информацию путем ее анализа, определять применимость информации (классифицировать), находить в ней связи, закономерности и отличия, ассоциировать ее с подобной. [2]. Основное направление развития ИИ – это представление знаний и разработка систем, основанных на знаниях. Это комплекс технологических решений, позволяющих имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека [3].

В последнее время ИИ- направление сливается с инженерией знаний, т.е. – это электромеханические устройства, предназначенные для автоматизации человеческого труда (интеллектуальные роботы). Практически все современные роботы принадлежат к роботам с жесткой схемой управления и фактически представляют собой программируемые манипуляторы.

Например, разработка В.В. Мироненко (Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)), который разработал софт для обнаружения дефектов в изделиях при помощи искусственного интеллекта (ИИ). Программное обеспечение, изначально созданное в интересах авиационной отрасли, можно применить при тестировании различных объектов – от автомобилей до сельхозпродукции. Работа над проектом велась в рамках Программы «Приоритет 2030». Ученый использовал ИИ для

дефектоскопии авиационных деталей. Результатом исследования стала программа, для работы которой достаточно обычной видеокамеры и компьютера. При наведении объектива на объект система автоматически распознает местоположение, тип и количество дефектов. Если с деталью все в порядке, на это укажет зеленый индикатор. В случае обнаружения неполадок оператор увидит красную сигнальную метку. «Наличие трех камер позволит изучить состояние объекта в нескольких плоскостях. Если применить рентгеновскую камеру, то можно заметить внутренний брак. Софт включает в себя форму ввода данных, внутреннюю расчетную часть и форму вывода полученных результатов в удобном для пользователя формате изображения. Система реализована на языке C++, адаптирована под конкретное «железо» компьютера и работает в определенной последовательности, оборудование подключается к ПО через USB-порт. Все это делает разработку уникальной. Потенциальным клиентом является «Роскосмос» и компании, которые тесно сотрудничают с госкорпорацией», - добавил ученый.

Компания «Поккельс» презентовала установки с разным видом волоконных источников, различные мощности и форм-факторы, а также были представлены флагманская модель лазерной сварки P-Weld PRO, которая оснащена самым современным одноименным излучателем, позволяющим сваривать как черные, так и цветные металлы без деформации и изменения свойств материала, роботизированная ячейка лазерной сварки P-Weld 1500 на основе коллаборативного робота Universal Robots, установка лазерной маркировки P-Mark TT [4].

Компании из Москвы представили свою продукцию на объединенном стенде «Корпорации развития Зеленограда». Корпорация развития Зеленограда является подведомственной структурой Департамента предпринимательства и инновационного развития города Москвы при Правительстве Москвы и создана в целях построения эффективной экосистемы для развития предпринимательства, объединяющей интересы всех заинтересованных субъектов.

На коллективном стенде площадки международной выставки «Фотоника-2024» были представлены следующие достижения московских компаний:

- изделия из минерального и синтетического высокоочищенного кварцевого сырья, которые используются в микроэлектронике, светотехнике, оптике, фотонике и нефтехимии;
- станки для бесконтактной лазерной очистки поверхностей от следов нефтепродуктов, краски, ржавчины и других органических и неорганических загрязнений с любой поверхности;
- система мониторинга микроклимата с функциями термометра, гигрометра, термоиндикатора, терморегистратора для непрерывного измерения, фиксации и сохранения данных температуры воздуха и относительной влажности;
- лабораторная вакуумная установка со встроенным устройством подготовки и нанесения технологических покрытий;
- устройство нанесения материалов в вакуумном пространстве с изменяемым магнитным полем,двигающемся по гипотрохоиде, с гидropriводом;
- оптические элементы из синтетического корунда;
- цветные, редкоземельные, благородные металлы и простые полупроводниковые материалы высокой чистоты, а также термоэлектрические генераторные и холодильные материалы на основе халькогенидов висмута и сурьмы;
- умное стекло, разработанное на основе органической электрохромной полимерной технологии с изменяемой характеристикой светопропускания.

262 компании на площади более 3 000 кв. м показали свои инновационные разработки и образцы оборудования. И нынешняя выставка, которая выросла и по численности, и по площади – свидетельство того, что отрасль быстро и усиленно развивается.

Литература

1. <https://agnc.ru/news/16457>
2. Захаров Е.Н. Курс лекций по системному анализу. – Королев, МГОТУ, 2019.
3. ГОСТ Р 59277-2020 «Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта».
4. <https://www.istu.edu/novosti/pub/75275>;
<https://indpages.ru/news/soft-na-osnovye-eeee/>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ ЛИНЕЙНОГО КОМПАРАТОРА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ STUDY OF THE INFLUENCE OF STRAIGHTNESS OF A LINEAR COMPARATOR ON THE ERROR OF LENGTH MEASUREMENT

Новикова И.В., ФГУП «ВНИИФТРИ»
Novikova I. V., FSUE «VNIIFTRI»
тел.: +7(495)-526-63-84 доб. 22-10
e-mail: novikova_iv@vniiftri.ru.

Аннотация: для обеспечения запаса точности передачи единицы длины к поверяемому средству измерения длины необходимо совершенствовать эталон единицы длины. В работе рассмотрено исследование влияния прямолинейности линейного компаратора на погрешность измерения длины в рамках совершенствования ГЭТ 199–2018. В исследовании при предварительных расчетах определено наибольшее влияние отклонения от прямолинейности линейного компаратора и его зависимость от диапазона измерений. На основе полученных расчетов проведены экспериментальные измерения на линейном компараторе в диапазоне до 60 м и проанализированы полученные результаты.

The Abstract: to ensure a margin of accuracy in transmitting a unit of length to the length measuring instrument being verified, it is necessary to improve the standard of the unit of length. The paper considers the study of the influence of the straightness of a linear comparator on the error of measuring length as part of improving GET 199–2018. In the study, with preliminary calculations, the greatest influence of deviation from the straightness of the linear comparator and its dependence on the measurement range was determined. Based on the calculations obtained, experimental measurements were carried out on a linear comparator in the range up to 60 m and the results obtained were analyzed.

Ключевые слова: линейный компаратор, погрешность измерения длины, прямолинейность компаратора, метрологическая прослеживаемость, точность измерения.

Keywords: linear comparator, length measurement error, comparator straightness, metrological traceability, measurement accuracy.

Введение

Интенсивный рост научно-технического прогресса способствует к уменьшению погрешности средств измерения (СИ) длины и систем лазерных координатно-измерительных (ЛКИС), которая в настоящее время в соответствии с техническими характеристиками производителей, достигает $(0,5 \cdot L)$ мкм, где L – измеряемая длина в метрах. Для определения метрологических характеристик данных СИ с такой точностью необходимо совершенствовать эталонную базу.

Для передачи единицы длины ЛКИС и СИ длины в диапазоне до 60 м используют эталонный измерительный комплекс длины (ЭИКД), входящий в состав государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199–2018, неисключенная систематическая погрешность которого при доверительной вероятности равной 0,99 составляет ± 5 мкм на дистанции 60 м. В ЭИКД входят: стойки управ-

ления и контроля метеопараметров, эталонное СИ и линейный компаратор (далее – компаратор) [1]. Уменьшение погрешности измерений на ЭИКД достигается выбором точных приборов в качестве эталонного СИ и сокращением числа факторов, влияющих на погрешность измерений.

Поскольку погрешность ЭИКД должна быть меньше исследуемого на нем СИ длины [2], необходимо уменьшать погрешность компаратора при его создании и поддерживать при его эксплуатации. Для этого определяются его метрологические характеристики [3] и влияющие на них факторы, такие как: влияние температуры, давления и влажности окружающего воздуха, прямолинейности измерительной линии компаратора, расширения материалов компаратора и их деформации при длительной эксплуатации, фундамента основания компаратора и другие [4]. В рамках совершенствования ГЭТ 199–2018[5] с целью обеспечения единства координатных и коор-

динатно-временных измерений было проведено исследование прямолинейности измерительной линии компаратора ЭИКД по новой методике с использованием системы лазерной для измерения перемещений Fixturlaser XA Geometry. Научные труды на данную тему состоят в общем рассмотрении погрешности компараторов без исследования отдельных влияющих факторов. В работе рассматривается влияние фактора отклонения от прямолинейности измерительной линии компаратора на погрешность измерения длины.

При измерениях на компараторе в точках отклонения изменяется длина оптического пути [6] лазерного луча. Возникает разность [7] между действительным значением длины в точках с отклонением от прямолинейности и полученным значением, что вносит погрешность в измерения длины.

Компаратор состоит из основания, рельсовых направляющих качения (далее – рельс) и моторизованной платформы. Прямолинейность компаратора зависит от точности установки рельс [8] при его монтаже и от воздействия моторизованной платформы при движении по рельсам в процессе измерений. Таким образом, контроль прямолинейности компаратора необходимо осуществлять на протяжении всего времени его эксплуатации.

В работе проведены предварительные расчеты влияния прямолинейности на погрешность измерения длины [9, 10], измерения прямолинейности компаратора до 60 м и оценка полученных результатов в соответствии с предварительными расчетами.

Материалы и методы исследования

Прямолинейность компаратора в данной работе определяется методом прямых измерений [11], при котором значение единицы длины получают непосредственно от средства измерений. Для определения отклонения от прямолинейности использовалась система лазерная для измерения перемещений Fixturlaser XA Geometry с рабочим диапазоном измерений до 50 м, состоящая из: излучателя, подвижного приемника и дисплейного блока. Результатами измерения лазерной систе-

мой являются отклонения приемника по горизонтальной и вертикальной осям относительно лазерного луча излучателя.

Измерения проводились на компараторе в диапазоне до 60 м, расположенном в лаборатории ФГУП «ВНИИФТРИ». Как эталонное СИ использовалась система лазерная измерительная XL-80. В течение всего времени проведения измерений в лаборатории сохранялись следующие показания параметров окружающего воздуха: температура воздуха 20,18–20,35 °С, влажность воздуха 14,0–14,7 и давление 985,32–985,36 гПа.

Выполнение измерений и анализ результатов

Перед началом работ проведена установка Fixturlaser XA Geometry на компаратор длиной 60 м и его настройка (Рисунок 1). Излучатель фиксируется в начале компаратора, подвижный приемник перемещается в начальную точку проведения измерений вдоль линии компаратора (оси Z) и показания по оси Y (вертикальная ось) и по оси X (горизонтальная ось) на приемнике обнуляются.

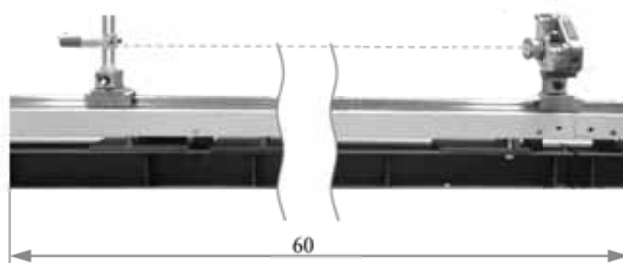


Рисунок 1 – Схема измерения для определения прямолинейности компаратора с использованием системы лазерной для измерения перемещений Fixturlaser XA Geometry

Далее приемник последовательно перемещается на контрольные точки, расположенные равномерно во всем диапазоне измерений с дискретностью 10 см. На каждой контрольной точке линии компаратора фиксируются новые значения отклонений по оси Y и по оси X, а перемещения вдоль линии компаратора фиксируются системой лазерной измерительной XL-80. По достижении приемником 50 м фиксируются показания отклонений и излучатель перемещается на дистанцию 45 м с проведением повторной настройки системы Fixturlaser

ХА Geometry для проведения измерений от 45 до 60 м.

Объединив полученные измерения отклонений по осям Х и Y до 50 м в первый прием измерений и от 45 м до 60 м во второй прием измерений проводят вычисления результатов измерения отклонения прямолинейности компаратора по формулам (1)-(3).

$$\Delta = L_{\text{дл}} - L, \quad (1)$$

где L – значение измеряемой длины, полученное лазерной интерферометрической измерительной системой;

$L_{\text{дл}}$ – измеренное значение длины с внесением значения отклонения от прямолинейности компаратора (2).

$$L_{\text{дл}} = \sqrt{L^2 + D^2}, \quad (2)$$

где D – расстояние от измеряемой точки до точки результирующего отклонения (3).

$$D = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad (3)$$

где Δx , Δy – приращения измеренных координат, полученных при помощи методик определения прямолинейности компаратора.

При предварительном расчете по формулам (1)-(3) получено наибольшее влияние отклонения от прямолинейности компаратора на измерения длины в начале компаратора (Рисунок 4). Определена зависимость отклонения от прямолинейности от измеряемой длины при установленной максимально допустимой погрешности измерения длины в 1 мкм на всем диапазоне длины 60 м (Рисунок 5). Максимально допустимая погрешность 1 мкм на дистанции 60 м получена при отклонении прямолинейности 7,75 мм, а на дистанции 5 м максимально допустимая погрешность измерения длины получена при отклонении 1 мм.

Результаты полученные при измерениях на компараторе представлены на графиках (рисунок 2 и рисунок 3):



Рисунок 2 – Результаты отклонения от прямолинейности по горизонтали (ось X) полученные с помощью Fixturlaser



Рисунок 3 – Результаты отклонения от прямолинейности по вертикали (ось Y) полученные с помощью Fixturlaser

По результатам измерений получены значения отклонения от прямолинейности компаратора в диапазоне до 60 м по вертикальной и горизонтальной осям до 1,15 мм и 1,12 мм соответственно.

После обработки измерительной информации получена погрешность (Δ), возникающая при измерении длины на исследуемом компараторе.

Полученная погрешность входит в бюджет погрешностей компаратора и составляет до 0,08 мкм (рисунок 4).

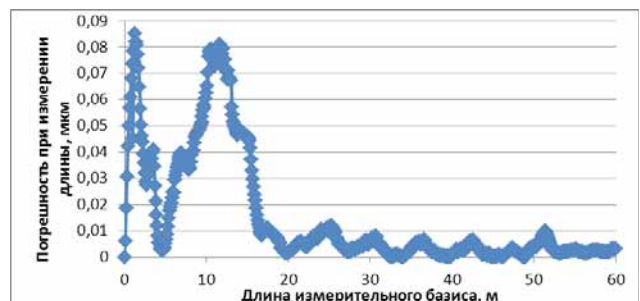


Рисунок 4 – Результаты погрешности измерений длины на компараторе по результатам отклонения от прямолинейности

Обсуждение и заключение

При предварительном расчете получена максимально допустимая погрешность измерения длины (1 мкм) на дистанции 60 м получена при отклонении прямолинейности по горизонтальной и вертикальной осям 7,75 мм. На дистанции 5 м максимально допустимая погрешность измерения длины получена при отклонении по горизонтальной и вертикальной осям 1,005 мм.

В ходе проведенных измерений прямолинейности линейного компаратора в диапазоне до 60 м с использованием системы лазерной для измерения перемещений Fixturlaser XA Geometry подтверждены теоретические расчеты и выявлено максимальное отклонение прямолинейности не более 1,12 мм по горизонтальной оси и не более 1,15 мм по вертикальной оси на всем диапазоне измеряемой длины. Данные отклонения прямолинейности линейного компаратора в диапазоне до 60 м вносят погрешность не более 0,08 мкм при измерении длины. Полученные значения могут оказывать влияние на результаты измерений при оценке характеристик прецизионных СИ длины и систем лазерных координатно-измерительных, где погрешность измерения длины составляет 0,5 мкм на 1 м.

Литература

1. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от 1·10⁻⁹ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм. Утверждена приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от «29» декабря 2018 г. № 2840.
2. Федеральный закон “Об обеспечении единства измерений” от 26.06.2008 г. N 102-ФЗ.
3. Соколов Д.А., Олейник-Дзядик О.М., Сильвестров И.С. Эталонный измерительный комплекс длины в диапазоне до 60 м из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины в диапазо-

не 24 м – 4000 км (ГПСЭД). Труды института прикладной астрономии РАН, 2020. № 52. С. 63–67.

4. Новикова И.В., Мазуркевич А.В., Колмогоров О.В., Донченко С.С., Любченко Д.А. Анализ способов разрешения неоднозначности фазовых измерений, проводимых с помощью макета оптического светодальномера с субмиллиметровым разрешением // Метрология времени и пространства. Материалы X Международного симпозиума. Менделеево, 2021. с. 108–112.
5. Сильвестров И.С., Печерица Д.С., Мазуркевич А.В., Карауш Е.А., Лесниченко В.И. Метрологическое обеспечение координатных и координатно-временных средств измерений в РФ // Геопрофи, 2023. № 6. – с. 8–14.
6. Лавров Е.А. Двухволновый дисперсионный метод в прецизионном транспортируемом лазерном интерферометре // Метрология в XXI веке. Материалы VIII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов, 2021. – с. 226–230.
7. Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. Радиогодезические и электрооптические измерения: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1985. – 290 с.
8. Новикова И.В. Экспериментальное исследование методик определения инструментальной составляющей систематической погрешности измерений эталонного измерительного комплекса длины в диапазоне до 60 м при работе с фазовым светодальномером // Научно-технический журнал «Вестник метролога», 2023. № 1. С. 31–36.
9. Новикова И.В., Соколов Д.А. Экспериментальное исследование соосной и ортогональной методик сравнения лазерных измерительных интерферометрических систем // Альманах современной метрологии. – 2021. – № 4(28). – с. 244.
10. ГОСТ Р 8.736–2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
11. Дойников А.С. Лекции по метрологии. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. – с. 67.

МЕТОД ИТЕРАТИВНОЙ РЕГУЛЯРИЗОВАННОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ THE METHOD FOR ITERATIVE REGULARIZED ESTIMATION OF DYNAMIC SYSTEM PARAMETERS

Кузнецов А.А., к.т.н., доцент, ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж
Kuznetsov A.A. k.t.s., MTRC AF «AFA» Voronezh
smithaa@yandex.ru,
tel. +7(903)656-23-32

Аннотация: предложен метод решения некорректно поставленной задачи оценки параметров динамической системы, функционирующей в условиях априорной неопределенности относительно характера внешних воздействий. Полученные решения – итеративные регуляризованные алгоритмы для непрерывного и дискретного времени – отличаются логикой определения параметра регуляризации.

The Abstract: the method for solving the incorrectly set task estimation of dynamic system parameters in conditions of a priori uncertainty about the nature of external influences, is proposed. The obtained solutions – iterative regularized algorithms for continuous and discrete time – differ in the logic of determining the regularization parameter.

Ключевые слова: динамические измерения, принцип регуляризации А.Н. Тихонова, метод минимальных ошибок, метод скорейшего спуска, двухточечная краевая задача.

Key words: dynamic measurements, the regularization principle of A.N. Tikhonov, the minimum error method, the method of rapid descent, two-point edge problem.

Актуальность вопросов, возникающих при проведении динамических измерений, – одна из причин выделения их в самостоятельный раздел метрологии. Теория динамических измерений заимствует из смежных дисциплин различные методы для решения задачи оценки параметров динамических систем, функционирующих в условиях априорной неопределенности относительно характера внешних воздействий.

В классической постановке задачи оценки параметров динамических систем характер внешних воздействий в математической модели их динамики предполагается известным [1]. На практике часто бывает так, что характер внешних воздействий неизвестен. Такая априорная неопределенность является причиной того, что существующие классические алгоритмы оценки параметров динамических систем недостаточно эффективны в плане точности получаемых оценок. Достойной альтернативой им могут служить разработанные итеративные регуляризованные алгоритмы [2–8].

В настоящей работе представлен метод итеративной регуляризованной оценки параметров динамических систем, позволивший получить итеративные регуляризованные алгоритмы, отличающиеся логикой определения параметра регуляризации.

Постановка задачи оценки параметров динамических систем

Пусть имеется некоторая динамическая система, состояние которой изменяется во времени и описывается системой дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dx}{dt} + f(x, t) = \eta, \quad x(0) = x^0, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad \eta \in \mathbb{R}^n, \quad (1)$$

где $x(t)$ – вектор параметров исследуемой системы; $\eta(t)$ – неизвестное внешнее возмущение, удовлетворяющее условию физической реализуемости: $\int_{t_1}^{t_2} (\eta(t))^2 dt < \infty$, где $[t_1, t_2]$ – время измерений; $f(x, t)$ – переходная функция системы, непрерывная вместе с производными по совокупности переменных.

Допускаем, что с помощью различных методов известные систематические погрешности результатов измерений исключены.

Уравнение измерения имеет вид

$$y(t) = H(x, t) + n(t), \quad y \in \mathbb{R}^m, \quad n \in \mathbb{R}^m, \quad (2)$$

где $H(x, t)$ – функция преобразования, реализуемая измерительным прибором, непрерывная по совокупности переменных; $n(t)$ – вектор белого гауссовского шума с известными локальными характеристиками

$$\mathbf{M}[\mathbf{n}(t)] = 0, \quad \mathbf{M}[\mathbf{n}(t)\mathbf{n}^T(t + \tau)] = \frac{\mathbf{N}\delta(\tau)}{2}, \quad (3)$$

где $\delta(t)$ – векторная дельта-функция; $\mathbf{N} \in \mathbf{R}^m \times \mathbf{R}^m$ – матрица интенсивностей; T – знак транспонирования.

Ставится задача оценки $\hat{\mathbf{x}}(t)$ по результатам измерений $\mathbf{y}(t)$. Оценка должна быть оптимальной в смысле минимума неотрицательного функционала

$$J[\hat{\mathbf{x}}(t)] = \frac{1}{2} \int_0^t (\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}, s))^T \mathbf{N}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}, s)) ds \rightarrow \min. \quad (4)$$

Функционал (4) характеризует точность измерений, аддитивен и неотрицателен. Задача решается в условиях априорной неопределенности при условии реализуемости неизвестных внешних воздействий.

Итеративная регуляризованная оценка параметров динамических систем в непрерывном времени

В силу непрерывности переходной функции $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ решения уравнения (1) непрерывно зависят от $\boldsymbol{\eta}(t)$ в соответствии с теоремой о непрерывной зависимости решения дифференциального уравнения от параметров и исходных данных [9]. Поэтому функционал ошибки (4) на каждом решении системы (1) непрерывно зависит от $\boldsymbol{\eta}(t)$, $\mathbf{J}[\mathbf{x}] = \mathbf{J}[\boldsymbol{\eta}]$. Из этого следует, что задача определения оценки $\hat{\mathbf{x}}(t)$, доставляющей минимум (4), равносильна задаче определения

$$\boldsymbol{\eta}^*(t) = \arg \min_{\boldsymbol{\eta}} J[\boldsymbol{\eta}]. \quad (5)$$

Задача (1), (2), (5) согласно [10] является некорректно поставленной.

Для решения задачи (1), (2), (5) используем метод регуляризации А. Н. Тихонова [10].

Допустим, что элемент $\boldsymbol{\eta}^*(t)$, минимизирующий функционал $\mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}]$, существует. Тогда для реализации метода А.Н. Тихонова достаточно построения минимизирующей последовательности $\{\boldsymbol{\eta}_n(t)\}$, сходящейся к $\boldsymbol{\eta}^*(t)$ [10]. Следует отметить, что для существования и единственности элемента $\boldsymbol{\eta}^*$ требуется его принадлежность множеству, компактно и непрерывно вложенному в некоторое простран-

ство $\Sigma \subset \mathbf{R}^n$. Будем полагать, что такое множество существует, определяемое, например, в случае, если Σ – пространство непрерывных функций, теоремой Арцела [11] о необходимых и достаточных условиях компактности множества в пространстве непрерывных функций [10].

Рассмотрим сглаживающий функционал

$$\mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}] = \mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}] + \alpha \boldsymbol{\Omega}[\boldsymbol{\eta}], \quad (6)$$

где $\boldsymbol{\Omega}[\boldsymbol{\eta}] = \frac{1}{2} \int_0^t \boldsymbol{\eta}^T(s) \boldsymbol{\eta}(s) ds$ – стабилизирующий

функционал [10],

α – положительное число (параметр регуляризации).

Функционал $\mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}]$ неотрицательный, поэтому существует его нижняя грань и если $\{\alpha_n\}$ – убывающая последовательность положительных чисел, сходящихся к нулю ($\alpha_n \rightarrow 0$), то соответствующая последовательность $\{\boldsymbol{\eta}_n(t)\}$ согласно [10] сходится к $\boldsymbol{\eta}^*(t)$.

Для дифференцируемого выпуклого функционала $\mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}]$ минимум находится путем определения стационарной точки, в которой

$$\text{grad } \mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}] = 0 \quad (7)$$

при ограничениях (1), (2).

Выражение для записи градиента в развернутом виде для задачи (1), (2), (6) может быть представлено согласно [12] следующим образом

$$\text{grad } \mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}] = \alpha \boldsymbol{\eta}(s) + \int_s^t \mathbf{K}^T(s, \tau) \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(s), \mathbf{x}_\eta(\tau), \tau)] d\tau. \quad (8)$$

где $\mathbf{K}^T(s, \tau)$ – фундаментальная матрица, удовлетворяющая однородному линейному уравнению

$$\frac{d}{d\tau} \mathbf{K}(s, \tau) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}_\eta(\tau), \tau) \mathbf{K}(s, \tau), \quad \mathbf{K}(s, \tau) = \mathbf{I}.$$

Здесь $\mathbf{I}$ – единичная матрица, а значение производной $\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}$ найдены на решениях системы

$$\frac{d\mathbf{x}_\eta}{d\tau} + \mathbf{f}(\mathbf{x}_\eta, \tau) = \boldsymbol{\eta}(\tau), \quad \tau \in [s, t], \quad \mathbf{x}_\eta(\tau)|_{\tau=s} = \hat{\mathbf{x}}(s). \quad (9)$$

Используя условие стационарности (7), запишем

$$\boldsymbol{\eta}^*(s) = \alpha^{-1} \int_s^t \mathbf{K}^T(s, \tau) \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(s), \mathbf{x}_\eta(\tau), \tau)] d\tau. \quad (10)$$

Найти точку $[\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}^*]$ путем решения совокупности уравнений (7), (8), (9), (10) в условиях некорректности исходной задачи достаточно сложно, поэтому широкое распространение получили методы последовательного приближения к стационарной точке [13].

Рассмотрим метод простых итераций

$$\boldsymbol{\eta}_{k+1} = \boldsymbol{\eta}_k - \alpha_k \cdot \text{grad } \mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}_k, \boldsymbol{\eta}_k]. \quad (11)$$

Для сокращения записи введем обозначение $\mathbf{B}(\hat{\mathbf{x}}, \tau) = \mathbf{K}^T(s, \tau) \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}, \tau)]$. Тогда с учетом (8) алгоритм (11) может быть представлен в виде

$$\boldsymbol{\eta}_{k+1}(s) = \boldsymbol{\eta}_k(s) [1 - \alpha_k^2] - \alpha_k \int_s^t \mathbf{B}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}(s), \tau) d\tau.$$

Приняв за нулевое приближение, запишем итерационную последовательность в развернутой форме [2]

$$\boldsymbol{\eta}_0(\tau) = 0, \quad \dot{\hat{\mathbf{x}}}_0 + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_0, \tau) = \boldsymbol{\eta}_0(\tau), \quad \tau \in [s, t];$$

$$\boldsymbol{\eta}_1(s) = -\alpha_0 \int_s^t \mathbf{B}(\hat{\mathbf{x}}_1(s), \tau) d\tau, \quad \dot{\hat{\mathbf{x}}}_1 + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_1, s) = \boldsymbol{\eta}_1, \quad s \in [0, t];$$

$$\boldsymbol{\eta}_2(s) = -\alpha_0 [1 - \alpha_1^2] \int_s^t \mathbf{B}(\hat{\mathbf{x}}_1(s), \tau) d\tau - \alpha_1 \int_s^t \mathbf{B}(\hat{\mathbf{x}}_2(s), \tau) d\tau,$$

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_2 + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_2, s) = \boldsymbol{\eta}_2, \quad s \in [0, t]; \quad (12)$$

.....

$$\boldsymbol{\eta}_{k+1}(s) = -\int_s^t \sum_{i=1}^{k+1} \gamma_i \mathbf{B}(\hat{\mathbf{x}}_i(s), \tau) d\tau, \quad \dot{\hat{\mathbf{x}}}_{k+1} + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}, s) = \boldsymbol{\eta}_{k+1} \quad s \in [0, t],$$

где $\gamma_i^k = \alpha_{i-1} [1 - \alpha_i^2] \cdot \dots \cdot [1 - \alpha_{k-1}^2]$, $i = \overline{1, k}$, точка обозначает производную по времени.

Уравнение $k+1$ приближения оценки $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$ имеет вид

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_{k+1} + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}, s) = -\int_s^t \sum_{i=1}^{k+1} \gamma_i \mathbf{B}(\hat{\mathbf{x}}_i(s), \tau) d\tau. \quad (13)$$

Полученное уравнение (13) определяет $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}(s)$, $s \in [0, t]$, как решение задачи сглаживания данных измерения $\mathbf{y}(s)$, $s \in [0, t]$, в смысле критерия (6) при фиксированном значении момента времени t . Необходимо отметить, что решение данного уравнения можно найти, лишь получив последовательность $\{\hat{\mathbf{x}}_i\}$, $i = \overline{1, k}$, и эти оценки входят в (13) уже как из-

вестные функции времени. Искомое решение было получено с использованием метода инвариантного погружения [14, 15] – были получены уравнения итеративного алгоритма оценки

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\mathbf{x}}_1}{dt} + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_1, t) &= -\mathbf{P}_1 \gamma_1^1 \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_1, t), \\ \frac{d\mathbf{P}_1}{dt} &= \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1 \frac{\partial \mathbf{f}^T}{\partial \mathbf{x}} + \gamma_1^1 \mathbf{P}_1 \frac{\partial \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_1, t)}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{P}_1 + \mathbf{I}, \\ \frac{d\hat{\mathbf{x}}_2}{dt} + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_2, t) &= -\mathbf{P}_1 [\gamma_1^2 \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_1, t) + \gamma_2^2 \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_2, t)], \\ \frac{d\mathbf{P}_2}{dt} &= \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_2 \frac{\partial \mathbf{f}^T}{\partial \mathbf{x}} + \gamma_2^2 \mathbf{P}_2 \frac{\partial \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_2, t)}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{P}_2 + \mathbf{I}, \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}{dt} + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}, t) = -\mathbf{P}_{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} \gamma_i^{k+1} \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_i, t),$$

$$\frac{d\mathbf{P}_{k+1}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{P}_{k+1} + \mathbf{P}_{k+1} \frac{\partial \mathbf{f}^T}{\partial \mathbf{x}} + \gamma_{k+1}^{k+1} \mathbf{P}_{k+1} \frac{\partial \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}, t)}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{P}_{k+1} + \mathbf{I},$$

где $\mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_i, t) = \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_i(t), t)]$; $\mathbf{I}$ – единичная матрица;

$\mathbf{P}_{k+1}(t)$ – матрица, которая является аналогом ковариационной матрицы ошибок фильтрации;

$$\gamma_i^k = \alpha_{i-1} [1 - \alpha_i^2] \cdot \dots \cdot [1 - \alpha_{k-1}^2], \quad i = \overline{1, k},$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \alpha_k = \infty, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 < \infty. \quad (15)$$

Полученная система уравнений (14) в совокупности с (15) представляет собой итеративный алгоритм оценки на основе метода простых итераций (ИАМПИ) в непрерывном времени [7]. Анализ уравнений алгоритма показывает, что первая пара уравнений представляет собой расширенный ФКБ, а остальные уравнения алгоритма отличаются от уравнений фильтра Калмана-Бьюси за счет возникновения дополнительных связей оценки $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$ с совокупностью предыдущих оценок $\hat{\mathbf{x}}_1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_k$ и входными параметрами функции, учитываемых с весовыми коэффициентами, определяемыми последовательностью параметров α , и изменяющих общий коэффициент обратной связи в уравнении для оценки $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$. Точность получаемых оценок повышается за счет последовательного уточнения оценок на основе метода простых итераций. Существенным недостатком разработанного алгоритма является необходимость подбора параметра α , подчиненного условиям (15).

Постановка задачи оценки параметров динамических систем в дискретном времени

Пусть имеется некоторая динамическая система, состояние которой изменяется во времени и описывается выражением

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{F}(\mathbf{x}(k), k) + \mathbf{G}\boldsymbol{\eta}(k), \\ k &= \overline{0, N-1}, \quad \mathbf{x}(0) = \hat{\mathbf{x}}(0), \end{aligned} \quad (16)$$

где $\mathbf{x}(k) = [x^1(k), x^2(k), \dots, x^M(k)]^T \in \mathbf{E}^M$ – вектор параметров исследуемой системы;

$\boldsymbol{\eta}(k) = [\eta^1(k), \eta^2(k), \dots, \eta^M(k)]^T \in \mathbf{E}^M$ – вектор неизвестных внешних воздействий, удовлетворяющих условию физической реализуемости; $\mathbf{F}(\mathbf{x}(k), k) = [F^1(x(k), k), F^2(x(k), k), \dots, F^M(x(k), k)]^T \in \mathbf{E}^M$ – переходная функция, непрерывная вместе с частными производными вектор-функция своих аргументов; предполагается, что матрица имеет обратную; $\mathbf{G} \in \mathbf{E}^M \times \mathbf{E}^M$ – матрица интенсивности внешних воздействий; k, N, M – натуральные числа.

Уравнение измерения имеет вид

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(\mathbf{x}(k)) + \mathbf{n}(k), \quad (17)$$

где $\mathbf{y}(k) = [y^1(k), y^2(k), \dots, y^L(k)]^T \in \mathbf{E}^L$ – вектор наблюдения;

$\mathbf{H}(\mathbf{x}(k)) = [H^1(x(k)), H^2(x(k)), \dots, H^L(x(k))]^T \in \mathbf{E}^L$ – векторная функция, непрерывная вместе с частными производными; $\mathbf{n}(k) = [n^1(k), n^2(k), \dots, n^L(k)]^T \in \mathbf{E}^L$ – вектор дискретного белого гауссовского шума с известными локальными характеристиками

$$\mathbf{M}[\mathbf{n}(k)] = 0, \quad \mathbf{M}[\mathbf{n}(k)\mathbf{n}^T(l)] = \mathbf{W}\delta(k-l),$$

$\mathbf{W}$ – ковариационная матрица размерности $L \times L$, $\delta(\cdot)$ – векторная дельта-функция; L, l – натуральные числа.

Ставится задача оценки $\hat{\mathbf{x}}(k)$ по результатам измерений $\mathbf{y}(k)$. Оценка должна быть оптимальной в смысле минимума неотрицательного функционала

$$\mathbf{J} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} [\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(k))]^T \mathbf{W}^{-1} [\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(k))] \rightarrow \min. \quad (18)$$

Функционал (18) характеризует точность измерений, аддитивен и неотрицателен. Задача реша-

ется в условиях априорной неопределенности при условии реализуемости неизвестных внешних воздействий.

Итеративная регуляризованная оценка параметров динамических систем в дискретном времени

В силу непрерывности вектор-функции $\mathbf{F}(\cdot)$, решение уравнения (16) непрерывно зависит от $\boldsymbol{\eta}(k)$, поэтому функционал ошибки (18) на каждом решении системы (16) непрерывно зависит от $\boldsymbol{\eta}(k)$. Таким образом, задача определения оценки $\hat{\mathbf{x}}(k)$, доставляющей минимум (18), равносильна задаче определения

$$\boldsymbol{\eta}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\eta}} \mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}]. \quad (19)$$

Задача (16), (17), (19) является некорректно поставленной обратной задачей [10].

Найти значения векторов $\hat{\mathbf{x}}(k)$, $\boldsymbol{\eta}^*(k)$, $k = \overline{1, N-1}$ путём решения совокупности уравнений (16), (17), (19) в условиях некорректности исходной задачи достаточно сложно, в связи с этим широкое распространение получили итерационные градиентные методы. Однако использование таких методов может привести к расходящейся последовательности приближений. Поэтому применение любого итерационного метода для решения задачи (16), (17), (19) требует определения регуляризирующего семейства операторов, в котором параметром регуляризации является номер итерации.

В соответствии с общим определением регуляризирующего семейства операторов по А.Н. Тихонову [10] итерационный метод (метод простых итераций)

$$\boldsymbol{\eta}_{n+1} = \boldsymbol{\eta}_n - \alpha_n \text{grad } \mathbf{J}[\mathbf{x}_n, \boldsymbol{\eta}_n], \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (20)$$

в котором числовой параметр α_n удовлетворяет условиям

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \alpha_k = \infty, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 < \infty,$$

порождает регуляризирующее семейство операторов, в котором параметром является номер итерации, если для любого начального приближения $\boldsymbol{\eta}_0$ и для любого значения погрешности исходных данных σ , удовлетворяющего условию $0 < |\sigma| < \sigma_0$, $\sigma_0 = \text{const}$, существует номер $n^*(\sigma)$ такой, что

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} \eta_{n^*}(\sigma) = \eta^*,$$

то есть полученные приближения сходятся к точному решению в норме пространства $L_2^M[0, \dots, N]$ при стремлении погрешности исходных данных к нулю.

Один из возможных подходов к выбору параметра регуляризации $n^*(\sigma)$ при использовании алгоритма простой итерации заключается в использовании критерия невязки, т.е. в выборе $n = n^*(\sigma)$ из условий согласования величины невязки

$$\Delta_n = \sum_{k=0}^{N-1} [y(k) - H(\hat{x}_n(k))]^T [y(k) - H(\hat{x}_n(k))]$$

с величиной $\text{Tr}(\mathbf{W})$, где Tr – след матрицы.

Таким образом, в качестве приближенного решения будем выбирать элемент итерационной последовательности с номером n^* удовлетворяющим условию [16]

$$n^* = \min \{n : \Delta_n \leq \text{Tr}(\mathbf{W})\}.$$

Для реализации итерационного метода (20) требуется определить градиент функционала (18).

Согласно [16] выражение для определения градиента в точке $\eta_n(k)$ имеет вид

$$\text{grad } J[x_n(k), \eta_n(k)] = G^T \Psi_n(k), \quad k = \overline{0, N-1}, \quad (21)$$

где $x_n(k)$ – решение (16) при $\eta_n(k)$, а вектор $\Psi_n(k)$ определяется из условий

$$\begin{aligned} \Psi_n(k) &= \frac{\partial F^T}{\partial x} \Psi_n(k+1) + W^{-1} \frac{\partial H^T}{\partial x} [y(k+1) - \\ &\quad - H(x_n(k+1))], \quad k = \overline{0, N-1}, \quad (22) \\ \Psi_n(N) &= 0. \end{aligned}$$

Приняв за нулевое приближение $\eta_0(k) = 0$, $k = \overline{0, N-1}$, запишем итерационную последовательность в развёрнутой форме для $k = \overline{0, N-1}$,

$$\begin{aligned} \eta_0(k) &= 0, \\ \eta_1(k) &= \eta_0(k) - \alpha_0 G^T \Psi_0(k) = -\alpha_0 G^T \Psi_0(k), \\ \eta_2(k) &= \eta_1(k) - \alpha_1 G^T \Psi_1(k) = -\alpha_0 G^T \Psi_0(k) - \alpha_1 G^T \Psi_1(k), \\ &\dots \\ \eta_{n+1}(k) &= -G^T \sum_{i=0}^n \alpha_i \Psi_i(k). \end{aligned}$$

В результате, с учетом (22), имеем последовательность дискретных двухточечных краевых задач (ДДТКЗ) вида

$$\begin{aligned} x_n(k+1) &= F(x_n(k), k) - GG^T \sum_{i=0}^n \alpha_i \Psi_i(k), \\ \Psi_i(k) &= \frac{\partial F^T}{\partial x} \Psi_i(k+1) + W^{-1} \frac{\partial H^T}{\partial x} [y(k+1) - H(x_i(k+1))], \\ \Psi_i(N) &= 0, x_i(0) = \hat{x}(0), \\ i &= \overline{0, n}, \quad k = \overline{0, N-1}. \end{aligned} \quad (23)$$

Введем обозначение $\lambda_n = \sum_{i=0}^n \alpha_i \Psi_i(k)$ и помножим каждое из уравнений для сопряженных векторов Ψ_i на величину α_i , тогда уравнения (23) принимают следующий вид

$$\begin{aligned} x_n(k+1) &= F(x_n(k), k) - GG^T \lambda_n, \\ \lambda_n(k) &= \frac{\partial F^T}{\partial x} \lambda_n(k+1) + W^{-1} \sum_{i=0}^n \alpha_i \frac{\partial H^T}{\partial x} [y(k+1) - H(x_i(k+1))], \\ \lambda_n(N) &= 0, x_i(0) = \hat{x}(0), \\ i &= \overline{0, n}, \quad k = \overline{0, N-1}. \end{aligned} \quad (24)$$

Заметим, что уравнение для вектор-функций λ в ДДТКЗ (24) записано в обратном времени. Это требует его преобразования к виду, отражающему зависимость $\lambda_n(k+1)$ от $\lambda_n(k)$ и $x_n(k)$. Производя соответствующие преобразования с учетом выражения для $x_n(k+1)$ из (24) и используя разложение в ряд Тейлора в окрестности $F(x_n(k), k)$, получим следующую последовательность ДДТКЗ

$$\begin{aligned} x_n(k+1) &= F(x_n(k), k) + GG^T \lambda_n(k), \\ \lambda_n(k+1) &= \left(\frac{\partial F^T}{\partial x} \right)^{-1} [\lambda_n(k) - W^{-1} \sum_{i=0}^n \alpha_i \frac{\partial H^T}{\partial x} [y(k+1) - H(x_i(k+1/k))]] - \\ &\quad \frac{\partial}{\partial x} \left\{ W^{-1} \sum_{i=0}^n \alpha_i \frac{\partial H^T}{\partial x} [y(k+1) - H(x_i(k+1/k))] \right\} GG^T \lambda_n(k), \\ x_i(k+1/k) &= F(x_i(k), k), \\ x_i(0) &= \hat{x}(0), \quad \lambda_n(N) = 0, \quad i = \overline{0, n}, \quad k = \overline{0, N-1}. \end{aligned} \quad (25)$$

Решение ДДТКЗ (25) с использованием метода инвариантного погружения в дискретном времени позволило получить уравнения итеративного алгоритма оценки

$$\begin{aligned} \hat{x}_n(k+1) &= F(\hat{x}_n(k), k) + P_n(k+1) M_n(k+1/k), \\ P_n(k+1) &= \left\{ I - \frac{\partial M_n(k+1/k)}{\partial \hat{x}} P_n(k+1/k) \right\}^{-1} P_n(k+1/k), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_n(k+1/k) &= \mathbf{W}^{-1} \sum_{i=0}^n \alpha_i \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} [\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_i(k+1/k))], \\
 \mathbf{P}_n(k+1/k) &= \mathbf{G}\mathbf{G}^T + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}_n(k) \frac{\partial \mathbf{F}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}}, \\
 \hat{\mathbf{x}}_i(0) &= \hat{\mathbf{x}}(0), \\
 \mathbf{P}_i(0) &= \mathbf{P}(0), \\
 i &= \overline{0, n}, \quad k = \overline{0, N-1}, \\
 \lim_{i \rightarrow \infty} \alpha_i &= 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \alpha_i = \infty, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 < \infty. \quad (27)
 \end{aligned}$$

Последовательность уравнений (26) в совокупности с (27) представляет собой ИАМПИ в дискретном времени [3, 7]. Анализ полученных уравнений (26) показывает, что уравнение оценки $\hat{\mathbf{x}}_0$ полностью совпадает с уравнением оценки фильтра Калмана-Бьюси, а остальные уравнения алгоритма отличаются от уравнений фильтра Калмана-Бьюси за счет возникновения дополнительных связей оценки $\hat{\mathbf{x}}_n$ с совокупностью предыдущих оценок $\hat{\mathbf{x}}_i$ учитываемых с весовыми коэффициентами, определяемыми последовательностью параметров α_i , и изменяющих общий коэффициент обратной связи в уравнении для оценки $\hat{\mathbf{x}}_n(k+1)$. Выбор последовательности параметров α_i , удовлетворяющих условиям (27), позволяет организовать вычисления с учетом величины интервала между соседними измерениями с целью получения максимально точных оценок измеряемых параметров. Следует отметить, что полученный результат предполагает, что исходная система, параметры которой подлежат оценке, нелинейна. Алгоритм (26) даёт оптимальную для нелинейной системы оценку параметров в смысле минимума функционала, характеризующего средне-квадратическую погрешность измерения.

Существенным недостатком ИАМПИ как для непрерывного (14–15), так и для дискретного (26–27) времени является необходимость экспериментального подбора параметра регуляризации. Анализ показывает, что методы, в которых шаг спуска выбирается переменным из условия минимума некоторого функционала качества на каждой итерации, эффективнее чем метод простых итераций [13, 17, 18]. Среди таких методов на практике наиболее распространены градиентные методы: минимальных ошибок, скорейшего спуска [13]. Рассмотрим применение градиентных методов для определения параметра регуляризации.

Определение параметра регуляризации с использованием градиентных методов

Рассмотрим применение градиентных методов: метода минимальных ошибок и метода скорейшего спуска – для нахождения точки $[\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}^*]$ в условиях некорректности исходной задачи.

Представим уравнение состояния (1) и уравнение измерения (2) в непрерывном времени, а также уравнение состояния (16) и уравнение измерения (17) в дискретном времени в следующем виде

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\eta} = \mathbf{y}, \quad (28)$$

где $\mathbf{A}$ – оператор, определяемый композицией уравнений (1), (2) – для непрерывного времени и (16), (17) – для дискретного времени.

Задача определения $\boldsymbol{\eta}$ по результатам $\mathbf{y}$ для непрерывного времени соответствует определению $\hat{\mathbf{x}}(t)$ по результатам $\mathbf{y}(t)$, а для дискретного времени – определению $\hat{\mathbf{x}}(k)$ по результатам $\mathbf{y}(k)$.

Получаемые оценки должны быть оптимальными в смысле минимума функционала (4) – для непрерывного времени и (18) – для дискретного времени.

Метод минимальных ошибок, как и метод скорейшего спуска, получается при выборе шага спуска на каждой итерации из условия минимума функционала

$$\|\boldsymbol{\eta}_{k+1} - \boldsymbol{\eta}\|^2 \rightarrow \min,$$

где $\boldsymbol{\eta}$ – решение уравнения (28).

Последовательность приближений в методе минимальных ошибок, как и в методе скорейшего спуска [13], имеет вид аналогичный методу простых итераций (11)

$$\boldsymbol{\eta}_{k+1} = \boldsymbol{\eta}_k - \alpha_k \cdot \text{grad } \mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}_k, \boldsymbol{\eta}_k], \quad (29)$$

где параметр регуляризации вычисляется следующим образом [13]:

для метода минимальных ошибок:

$$\begin{aligned}
 \alpha_0 &= 1 \\
 \alpha_k &= \frac{\Delta_k^2}{\|\text{grad } \mathbf{J}[\hat{\mathbf{x}}_k, \boldsymbol{\eta}_k]\|^2}, \quad (30)
 \end{aligned}$$

для метода скорейшего спуска:

$$\alpha_0 = 1, \quad \alpha_k = \frac{\|grad J[\hat{\mathbf{x}}_k, \boldsymbol{\eta}_k]\|^2}{\|\mathbf{A} grad J[\hat{\mathbf{x}}_k, \boldsymbol{\eta}_k]\|^2}. \quad (31)$$

Здесь и далее необходимо учитывать следующее: индекс k – номер итерации для случая с непрерывным временем, а для дискретного времени вместо индекса k будет индекс n .

Поскольку $grad J[\hat{\mathbf{x}}_k, \boldsymbol{\eta}_k] = \boldsymbol{\eta}_k$, то $\mathbf{A}\boldsymbol{\eta}_k = \mathbf{y}_k = \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)$. Тогда выражение (31) имеет вид

$$\alpha_k = \frac{\|grad J[\hat{\mathbf{x}}_k, \boldsymbol{\eta}_k]\|^2}{\|\mathbf{H}[\hat{\mathbf{x}}_k]\|^2}. \quad (32)$$

Запишем числители и знаменатели выражений для параметров регуляризации (30) и (32): для непрерывного времени:

$$\Delta_k^2 = \int_0^t [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), s)]^T [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), s)] ds, \quad (33)$$

$$\|grad J[\hat{\mathbf{x}}_k, \boldsymbol{\eta}_k]\|^2 = \int_0^t \int_s^t \left[\mathbf{K}^T \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), \mathbf{x}_k(\tau), \tau)] \right]^T \cdot \left[\mathbf{K}^T \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), \mathbf{x}_k(\tau), \tau)] \right] d\tau ds, \quad (34)$$

$$\|\mathbf{H}[\hat{\mathbf{x}}_k]\|^2 = \int_0^t [\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), s)]^T [\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), s)] ds; \quad (35)$$

для дискретного времени:

$$\Delta_n^2 = \sum_{k=0}^{N-1} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), k)]^T [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), k)], \quad (36)$$

$$\|grad J[\hat{\mathbf{x}}_n, \boldsymbol{\eta}_n]\|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \sum_{j=k}^{N-1} \left[\mathbf{G}_n^T(k, j) \mathbf{W}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), \mathbf{x}_{\eta_n}(j), j)] \right]^T \cdot \left[\mathbf{G}_n^T(k, j) \mathbf{W}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), \mathbf{x}_{\eta_n}(j), j)] \right] \right\}, \quad (37)$$

$$\|\mathbf{H}[\hat{\mathbf{x}}_n]\|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} [\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), k)]^T [\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), k)]. \quad (38)$$

С учетом записанных выражений (33, 34, 36, 37) выражения для параметра регуляризации, полученные с использованием метода минимальных ошибок, следующие:

для непрерывного времени

$$\alpha_0 = 1, \quad \alpha_k = \frac{\int_0^t [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), s)]^T [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), s)] ds}{\int_0^t \int_s^t \left[\mathbf{K}^T \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), \mathbf{x}_k(\tau), \tau)] \right]^T \left[\mathbf{K}^T \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), \mathbf{x}_k(\tau), \tau)] \right] d\tau ds}, \quad (39)$$

$$\alpha_0 = 1, \quad \alpha_n = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), k)]^T [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), k)]}{\sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \sum_{j=k}^{N-1} \left[\mathbf{G}_n^T(k, j) \mathbf{W}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), \mathbf{x}_{\eta_n}(j), j)] \right]^T \left[\mathbf{G}_n^T(k, j) \mathbf{W}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), \mathbf{x}_{\eta_n}(j), j)] \right] \right\}}. \quad (40)$$

С учетом записанных выражений (34, 35, 37, 38) выражения для параметра регуляризации, полученные с использованием метода скорейшего спуска, следующие:

для непрерывного времени

$$\alpha_0 = 1, \quad \alpha_k = \frac{\int_0^t \int_s^t \left[\mathbf{K}^T \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), \mathbf{x}_k(\tau), \tau)] \right]^T \left[\mathbf{K}^T \mathbf{N}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), \mathbf{x}_k(\tau), \tau)] \right] d\tau ds}{\int_0^t [\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), s)]^T [\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k(s), s)] ds}, \quad (41)$$

для дискретного времени

$$\alpha_0 = 1, \quad \alpha_n = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \sum_{j=k}^{N-1} \left[\mathbf{G}_n^T(k, j) \mathbf{W}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), \mathbf{x}_{\eta_n}(j), j)] \right]^T \left[\mathbf{G}_n^T(k, j) \mathbf{W}^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), \mathbf{x}_{\eta_n}(j), j)] \right] \right\}}{\sum_{k=0}^{N-1} [\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), k)]^T [\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_n(k), k)]}. \quad (42)$$

Таким образом, с использованием градиентных методов получены выражения (39–42) для вычисления параметра регуляризации. Полученные выражения для параметра регуляризации обеспечивают построение итерационных последовательностей вида (29).

Синтезированная система уравнений (14) в совокупности с (39), а также полученная система уравнений (26) в совокупности с (40) представляют собой итеративные алгоритмы оценки на основе метода минимальных ошибок (ИАММО) для непрерывного и дискретного времени соответственно [4, 6, 7].

Синтезированная система уравнений (14) в совокупности с (41), а также полученная система уравнений (26) в совокупности с (42)

представляют собой итеративные алгоритмы оценки на основе метода скорейшего спуска (ИАМСС) для непрерывного и дискретного времени, соответственно [5, 7].

Разработанные ИАММО и ИАМСС выгодно отличаются от ИАМПИ тем, что параметр регуляризации не подбирается, а вычисляется, что определило возникновение в них *итеративной логики*, заключающейся в последовательном уточнении получаемых оценок с самостоятельным вычислением на базе градиентных методов параметра регуляризации.

Во всех разработанных алгоритмах: ИАММО, ИАМСС и ИАМПИ – уравнения последующих оценок по форме идентичны с предыдущими. Поэтому для реализации разработанного алгоритма необходим всего лишь один блок решения уравнений оценки, в основу работы которого положен соответствующий алгоритм.

Поскольку во всех разработанных алгоритмах каждое последующее уравнение оценки используют в качестве входных параметров предыдущие оценки, то вычисления по указанным алгоритмам следует проводить с использованием рекурсивных функций.

В работе [7] представлен сравнительный анализ результатов исследования свойств разработанных итеративных регуляризованных алгоритмов обработки измерительной информации на основе результатов решения задачи оценки параметров динамических систем. Приведенные результаты исследований показывают, что все разработанные алгоритмы работоспособны: алгоритмы обеспечивают получение высокоточных устойчивых сходящихся оценок искомых параметров; третья итерация ИАММО и вторая итерация ИАМСС обеспечивают получение оценок, превосходящих по точности оценки ФКБ на 5–10%, причем вторая итерация ИАМСС – наилучшая; прирост в точности итераций разработанных алгоритмов связан с увеличением вычислительных затрат на их реализацию.

Таким образом, выше изложен метод итеративной регуляризованной оценки параметров динамических систем, функционирующих в условиях априорной неопределенности относительно характера внешних воздействий. Ме-

тод представляет собой совокупность приемов последовательного применения методов: метода регуляризации А.Н. Тихонова, метода инвариантного погружения, а также градиентных методов – для получения решений некорректно поставленной задачи оценки параметров динамической системы, функционирующей в условиях априорной неопределенности относительно характера внешних воздействий. Полученные решения – итеративные регуляризованные алгоритмы для непрерывного и дискретного времени [2–7] отличаются логикой определения параметра регуляризации. Разработанные алгоритмы обеспечивают получение высокоточных устойчивых сходящихся оценок искомых параметров и могут быть использованы в технике как в виде устройств, структурные схемы которых защищены патентами на изобретения [19–24], так и в виде программ обработки данных, на которые получены свидетельства о государственной регистрации [25, 26].

Литература

- Ранеев Г.Г., Суругин В.А., Калашников В.И. и др. Информационно-измерительная техника и технологии. М.: Академия. 2006. 512 с.
2. Костоглотов А.А. Синтез интеллектуальных измерительных процедур на основе принципа регуляризации А.Н.Тихонова. // Измерительная техника. 2001. № 1. С. 8–12.
3. Кузнецов А.А., Костоглотов А.А. Итеративная измерительная процедура оценки параметров групповых меры / Научная мысль Кавказа. Приложение. 2003. № 7 (48). С. 98–106.
4. Костоглотов А.А., Кузнецов А.А., Моисеев Д.В. Адаптивный алгоритм оценки параметров радиолокационных сигналов на основе метода минимальных ошибок. // Научно-технический сборник «Вопросы радиоэлектроники». Серия «Общие вопросы радиоэлектроники». 2003. Выпуск 1(21). С. 97–108.
5. Костоглотов А.А., Кузнецов А.А. Синтез алгоритма оценки параметров движения летательного аппарата на основе метода скорейшего спуска. // Автоматика и вычислительная техника. 2004. № 4. С. 53–62.

6. Костоготов А.А., Кузнецов А.А. Синтез интеллектуальной измерительной процедуры на основе метода минимальных ошибок. // Измерительная техника. 2005. № 7. С.8–13.
7. Кузнецов А.А., Костоготов А.А., Андрашитов Д.С., Лазаренко С.В. Итеративные регуляризованные алгоритмы обработки измерительной информации / Вестник компьютерных и информационных технологий, 2010, № 11, С. 3–9.
8. Кузнецов А.А., Костоготов А.А., Агапов А.А., Пеньков А.С., Лосев В.А., Лазаренко С.В. Метод интеллектуализации и измерительных процедур на базе использования адаптивных моделей динамических процессов объединенного принципа максимума и теории регуляризации // Инженерный вестник Дона № 5 (2019) <http://ivdon.ru/rumagazine/archive/n5y2019/6005> (дата обращения 07.03.2024).
9. Карташев А.П., Рождественский Б.Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления. – М.: Наука. 1986. 272 с.
10. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1986. 288с.
11. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. –М.: Наука. 1986. 496 с.
12. Детистов В.А., Таран В.Н. Синтез оптимального управления градиентным методом на основе прогнозирующей модели. //Автоматика и телемеханика. 1990. № 10. С. 45–56.
13. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1988. 288 с.
14. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 2. Теория нелинейной модуляции. М.: Советское радио. 1975. 344 с.
15. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. Идентификация систем управления. М.: Наука. 1974. 248с.
16. Васильев Ф. П. Методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1981. 400с.
17. Сейдж Э. П., Уайт Ч.С., III Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь. 1982. 392 с.
18. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления. СПб.: Питер. 2004. 256 с.
19. Патент 2209506 РФ, МПК H03H 17/00, G06F 17/17. Цифровой итеративный фильтр / Костоготов А.А., Фасоля А.А., Кузнецов А.А. и др. Оpubл. 27.07.2003. Бюл. № 21. 20 с.
20. Патент 2257667 РФ, МПК H03H 17/04, G06F 17/17. Цифровой рекурсивный фильтр / Кузнецов А.А., Костоготов А.А., Фасоля А.А. и др. Оpubл. 27.07.2005. Бюл. № 21. 19 с.
21. Патент 2357357 РФ, МПК H03H 17/04, G06F 17/17. Цифровой интеллектуальный рекурсивный фильтр / Кузнецов А.А., Костоготов А.А., Лазаренко С.В., Лапсарь А.П. Оpubл. 27.05.2009. Бюл. № 15. 27 с.
22. Патент 2362265 РФ, МПК H03H 17/04, G06F 17/17. Цифровой интеллектуальный итеративный фильтр / Кузнецов А.А., Костоготов А.А., Лазаренко С.В., Пономарев А.С. Оpubл. 20.07.2009. Бюл. № 20. 28 с.
23. Патент 2436228 РФ, МПК H03H17/04, G06F 17/17. Цифровой интеллектуальный многокаскадный фильтр / Кузнецов А.А., Костоготов А.А., Лазаренко С.В. и др. Оpubл. 10.12.2011. Бюл. № 34. 31 с.
24. Патент 2452080 РФ, МПК H03H17/04, G06F 17/17. Цифровой многоитерационный фильтр / Кузнецов А.А., Костоготов А.А., Лазаренко С.В. и др. Оpubл. 27.05.2012. Бюл. № 15. 33 с.
25. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010616572 РФ. Итеративный алгоритм оценки параметров измерительных процессов на основе метода минимальных ошибок / Кузнецов А.А., Безуглов Д.А., Костоготов А.А. и др. Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 1.10.10.
26. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010616568 РФ. Итеративный алгоритм оценки параметров измерительных процессов на основе метода скорейшего спуска / Кузнецов А.А., Безуглов Д.А., Костоготов А.А. и др. Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 1.10.10.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ЗАМКНУТЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ТИПА УПД-ИНТЕР

CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE IONIZING RADIATION FIELD OF CLOSED DOSIMETRIC INSTALLATIONS OF THE UPD-INTER TYPE

Стяжкин В.А., к.т.н., научно-технический комитет (Метрологическая служба ВС РФ),
базовая кафедра Технологического университета
Styazhkin V. A., k.t.s., Scientific and technical committee (Metrological service of the Armed Forces
of the Russian Federation), STC (MS AFRF)
+7 (962) 994-89-64
styazhkinva@yandex.ru

Аннотация: показана актуальность вопросов моделирования поля ионизирующих излучений. Получена математическая модель поля ионизирующих излучений замкнутой дозиметрической установки и определены пути её реализации и применения на практике.

Annotation: the relevance of the issues of modeling the field of ionizing radiation is shown. A mathematical model of the ionizing radiation field of a closed dosimetric installation has been obtained and the ways of its implementation and application in practice have been determined

Ключевые слова: эталонные дозиметрические установки; закон обратных квадратов; математическая модель; поле ионизирующих излучений; мощность дозы.

Keywords: reference dosimetric installations; inverse square law; mathematical model; ionizing radiation field; dose rate.

В настоящее время в метрологических подразделениях, занимающихся вопросами обеспечения радиационной безопасности, эксплуатируются эталонные дозиметрические установки закрытого типа УПД-ИНТЕР, УПД-ИНТЕР-М и УПД-ИНТЕР2М [1] (рисунок 1) (далее – замкнутые дозиметрические установки, УПД-ИНТЕР), общий принцип работы которых основан на применении одного источника, формирующего гамма-поле в закрытом защитном корпусе, и ослабляющих фильтров с постоянной величиной кратности ослабления излучения.

Компактность конструкции замкнутых дозиметрических установок обуславливает невозможность в целом обеспечить классические расчёты мощностей доз, основанные на выполнении закона обратных квадратов, поскольку в ГОСТ 8.087–2000 «Установки дозиметрические рентгеновского и гамма-излучений эталонные. Методика поверки по мощности экспозиционной дозы и мощности кермы в воздухе» [2] отсутствуют расчётные соотношения, учитывающие влияние внешних факторов на формирование полей гамма- и бета-излучений. Поэтому

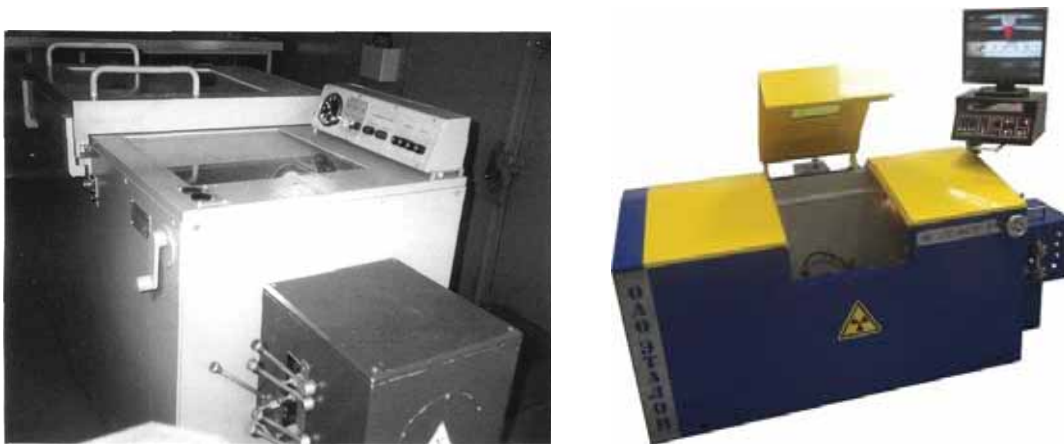


Рисунок 1 – Внешний вид эталонных дозиметрических установок типа УПД-ИНТЕР-М (слева) и УПД-ИНТЕР2М (справа и снизу)

му на практике для их периодической поверки приходится проводить длительные измерения дозиметрических характеристик в более чем 30-ти точках.

Задача повышения эффективности поверочных работ может быть решена с помощью метода статистических испытаний (метода Монте-Карло). При этом необходимо как можно полнее учесть влияние неконтролируемых случайных факторов, построив математическую модель поля ионизирующих излучений замкнутой дозиметрической установки, и сделать аргументированный вывод относительно оптимальных направлений её эксплуатации.

В установках УПД-ИНТЕР конструктивно обеспечена воспроизводимость строгих геометрических условий размещения источника, фильтров и блоков детектирования, что позволяет сделать предположение о неизменности характеристик поля ионизирующих излучений в заданных точках с течением времени (с учётом распада источника и суммарной погрешности измерений).

Требуется определить функциональную зависимость следующих взаимосвязанных величин, определяющих формирование поля фотонного излучения в замкнутой системе установки УПД-ИНТЕР [3]:

- мощность дозы $\dot{X}$;
- активность радионуклида в источнике A ;
- расстояние от источника до центра детектора R ;
- коэффициент ослабления излучения в воздухе μ ;
- кратность ослабления фильтров k_{ϕ} ;
- сопутствующее вторичное излучение: рассеянные фотоны и электроны $\dot{X}_{\text{вт}}$;
- сопутствующее тормозное излучение (наиболее характерно для бета-дозиметрии) $\dot{X}_{\text{тор}}$;
- метеорологические параметры окружающей среды (температура T , влажность φ , давление p);
- неисключённые систематические погрешности разного рода Θ_{pp} (средства, методы, различные коэффициенты и другие).

Таким образом, построение математической модели поля ионизирующих излучений замкну-

той дозиметрической установки в общем виде сводится к формированию неявной функции:

$$F(\dot{X}, A, R, \mu, k_{\phi}, \dot{X}_{\text{вт}}, \dot{X}_{\text{тор}}, T, \varphi, p, \Theta_{pp}) = 0. \quad (1)$$

Для корректного построения F пошагово разберём и выведем все составляющие данной функции.

Несмотря на стохастический характер ядерных распадов и физики процесса формирования потока частиц, в целом мощность дозы излучения источника в определённой точке пространства является величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения.

В общем случае мощность дозы $\dot{X}$, создаваемая точечным источником с активностью A на некотором расстоянии R от источника, прямо пропорциональна активности и обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$\dot{X} \sim \frac{A}{R^2}. \quad (2)$$

Необходимо отметить, что начальное значение величины A определяется заводом-изготовителем с относительно большой погрешностью, как правило, не превышающей 20 %, и указывается в паспорте на источник. Так как максимальная суммарная погрешность дозиметрических установок не должна превышать 8 %, а текущее значение активности радионуклидов источника не измеряется, последующая практическая привязка к величине A при их эксплуатации не проводится.

Ослабление интенсивности излучения фотонов в области средних энергий (до 10 МэВ) происходит в основном в результате трёх процессов: фотоэффекта, Комптон-эффекта (комптоновского рассеяния) и эффекта образования электрон-позитронных пар [4]. Вероятность возникновения каждого процесса характеризуется своим коэффициентом, зависящим от энергии фотонов и атомного номера материала источника. Как правило, все три процесса протекают одновременно, поэтому линейный коэффициент ослабления монохроматического фотонного излучения в возду-

где μ равен сумме трёх вышеуказанных коэффициентов:

$$\mu = \tau + \sigma + \chi, \quad (3)$$

где τ , σ , χ – линейные коэффициенты ослабления, характеризующие вероятность фотоэффекта, Комптон-эффекта и эффекта образования пар соответственно.

Так как выбор рабочих расстояний УПД-ИНТЕР ограничен малым диапазоном от 20 до 140 см, то однозначно вклад данного фактора в результат измерений будет несущественен. В соответствии с [2] при $T=20^\circ\text{C}$ и $p=100\pm 4$ кПа, μ равен $9,3\cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ (для цезия-137) и $7,0\cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ (для кобальта-60).

Проверку соблюдения закона квадратов расстояний проводят методом прямых измерений мощности дозы $\dot{X}$ в нескольких точках, равномерно распределённых вдоль градуировочной линейки с учётом линейного коэффициента ослабления фотонного излучения в воздухе μ [2]. В каждой точке проводят не менее пяти измерений и определяют их среднеарифметическое значение $\overline{X_i}$. Произведение среднеарифметического значения $\overline{X_i}$ в i -й рабочей точке на квадрат соответствующего расстояния R_i от центра активной части источника излучения до эффективного центра детектора должно быть постоянным с учётом ослабления излучения в воздухе, и рассчитывается по формуле:

$$C_i = \overline{X_i} \cdot R_i^2 \cdot e^{\mu R_i}. \quad (4)$$

Однако в сложившейся практике данная проверка выполняется только для установок, обеспечивающих условия, что расстояние от коллимированного пучка излучений до стен, пола и потолка не превышает 1,5 м (открытая геометрия). Разброс значений C_i , полученных в крайних точках градуировочной линейки, не должен превышать 2,5 % для установок 1-го разряда и 4 % – для установок 2-го разряда.

В зависимости от модификации и конструктивного исполнения УПД-ИНТЕР при проверке ис-

пользуется четыре или пять фильтров (и их комбинации) различной толщины и, соответственно, индивидуальной кратности ослабления $k_{\phi j}$, которая определяется по формуле:

$$k_{\phi j} = \frac{\dot{X}_i}{\dot{X}_{i\phi j}}, \quad (5)$$

$\dot{X}_{i\phi j}$ – мощность дозы в данной точке i , создаваемая источником, закрытым фильтром j .

В настоящее время действительные значения $k_{\phi j}$ на практике не применяются, так как возникнет необходимость их учёта в виде дополнительно вводимой погрешности определения коэффициентов ослабления фильтров θ_{ϕ} при расчётах основной относительной погрешности установки. Хотя практическое использование данного параметра может позволить существенно (на 20–40 %) сократить трудоёмкость поверочных работ как поверителя УПД-ИНТЕР, так и её оператора при повседневной штатной эксплуатации установки (при проверке дозиметрических средств измерений).

Возникновение сопутствующего вторичного $\dot{X}_{\text{вт}}$ и тормозного $\dot{X}_{\text{тор}}$ излучений также может оказывать определённое влияние на показания. На различных расстояниях от источника могут наблюдаться расхождения в мощности дозы, создаваемой им в открытой геометрии и в облучательном устройстве. Это объясняется тем, что излучение источника в открытой геометрии испускается в телесный угол 2π и на детектор блока детектирования попадает только та часть излучения, которая непосредственно направлена на него от источника. В облучательном же устройстве, вследствие прохождения гамма- или бета-частиц через металлические преграды (коллиматор, фильтры) дополнительно появляется тормозное излучение, а также излучение, направленное в сторону от детектора и частично отражённое от стенок устройства, так же может попадать на детектор (рисунки 2).

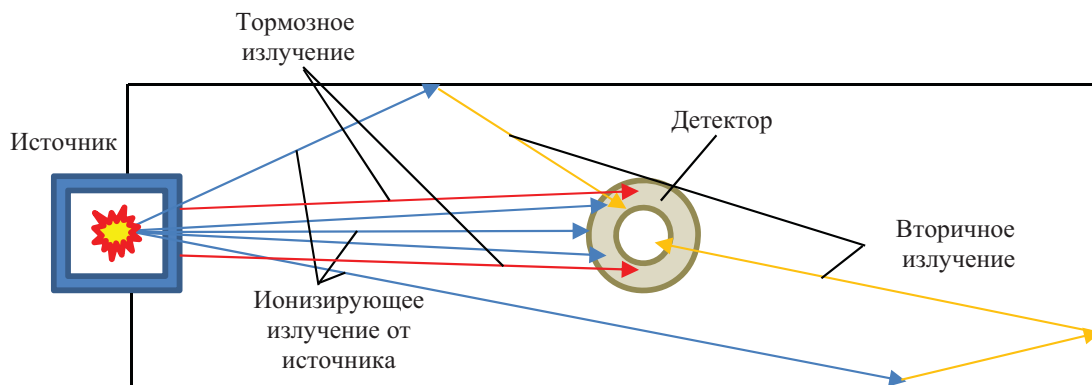


Рисунок 2 – Условная схема распространения ионизирующих излучений в замкнутых дозиметрических установках

Поэтому показания дозиметров, размещённых в замкнутых дозиметрических установках, местами отличаются относительно их показаний в открытой геометрии и на различных расстояниях от источника. Данное соотношение может достигать до 30 %.

В общем виде суммарная мощность дозы описывается формулой:

$$\dot{X}_i = \dot{X}_{ifj} + \dot{X}_{ibt} + \dot{X}_{itor}. \quad (6)$$

При этом величины сопутствующих излучений в каждой точке i непропорциональны исходной мощности дозы и слабо аппроксимируются, поэтому на практике точные значения $\dot{X}_{вт}$ и $\dot{X}_{тор}$ не вычисляются, а в расчётах используется суммарная мощность дозы в точке i , полученная эмпирическим путём.

В соответствии с [2] при проведении поверки установок должны соблюдаться нормальные условия, обеспечивающие климатические параметры окружающей среды, представленные в таблице 1.

При применении свободно-воздушных и полостных камер результаты измерений должны быть приведены к нормальным условиям по формуле:

$$\dot{X}_n = \dot{X} \cdot \frac{101,3}{p} \cdot \frac{273,15+T}{293,15}, \quad (7)$$

где $\dot{X}_n$ – результат измерений величины, приведённой к нормальным условиям ($T_0=20$ °С, $p_0=101,3$ кПа);

$\dot{X}$ – значение величины, измеренной при температуре окружающего воздуха T и атмосферном давлении p .

Так как полостные камеры блоков детектирования существующих эталонных дозиметров имеют герметичный корпус, значения относительной влажности воздуха непосредственно на результат измерений не влияют и в формуле (7) не фигурируют.

Учитывая совокупность вышеуказанных влияющих факторов, преобразуем формулу (2) и получим математическую модель мощности дозы в точке i , создаваемой точечным источником с ак-

Таблица 1

Показатели нормальных условий окружающей среды

Климатический параметр	Значение климатического параметра
температура окружающего воздуха T	20 ± 5 °С
атмосферное давление p	101 ± 4 кПа
относительная влажность воздуха φ	60 ± 15 %

тивностью A на некотором расстоянии R_i от источника, который закрыт фильтром j :

$$\dot{X}_i = \left(\frac{A}{k_{\Phi j}(R_i^2 \cdot e^{\mu R_i})} + \dot{X}_{\text{вт}} + \dot{X}_{\text{тор}} \right) \cdot \frac{101,3}{p} \cdot \frac{273,15 + T}{293,15} \quad (8)$$

Согласно [2] основную относительную погрешность эталонных дозиметрических установок при доверительной вероятности 0,95 в каждой рабочей точке вычисляют по формуле:

$$\Delta_{\Sigma i} = k \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (\theta_0^2 + \theta_R^2 + \theta_{ti}^2 + \Delta^2) + S^2} \quad (9)$$

где k – коэффициент, зависящий от случайной и неисключенной систематической погрешностей и доверительной вероятности 0,95, определяемой ГОСТ 8.207 (в настоящее время актуальный ГОСТ Р 8.736–2011 [5]) и ГОСТ 8.381;

θ_0 – основная погрешность эталонного дозиметра, с помощью которого проводится поверка (берётся из свидетельства о поверке), %;

θ_R – погрешность определения расстояния от источника до центра детектора, %;

θ_{ti} – погрешность коэффициентов перехода от единиц экспозиционной дозы к единицам кермы в воздухе, поглощённой и эквивалентной доз, %;

Δ – погрешность метода передачи единицы, которая составляет 0,8 % по ГОСТ 8.034 (в настоящее время применяется приказ Росстандарта от 31 декабря 2020 г. № 2314 [6]), %;

S – оценка среднеквадратического отклонения результата измерения мощности дозы по ГОСТ Р 8.736–2011, %.

Однако, в случае проведения расчётов мощности дозы по формуле (8) необходимо ввести дополнительные составляющие основной относительной погрешности, обусловленные погрешностями определения $k_{\Phi j}$, $\dot{X}_{\text{вт}}$ и $\dot{X}_{\text{тор}}$.

Таким образом, полученная математическая модель поля ионизирующих излучений замкну-

той дозиметрической установки, учитывающая влияние неконтролируемых случайных факторов, может служить априорной информацией при решении задачи повышения эффективности поверочных работ. При этом в связи с невозможностью достоверного и точного определения величин активности радионуклидного источника A установок УПД-ИНТЕР и мощностей доз сопутствующих излучений (вторичного $\dot{X}_{\text{вт}}$ и тормозного $\dot{X}_{\text{тор}}$) в последующих исследованиях требуется получить эмпирическую модель воспроизводимого поля ионизирующих излучений, базирующуюся на результатах статистической обработки ретроспективных экспериментальных данных, и скоррелировать её с полученной математической моделью.

Литература

1. Установки поверочные дозиметрические УПД-ИНТЕР2М. Описание типа средства измерений. Номер по Госреестру 36895–08.
2. ГОСТ 8.087–2000. Установки дозиметрические рентгеновского и гамма-излучений эталонные. Методика поверки по мощности экспозиционной дозы и мощности кермы в воздухе.
3. ГОСТ 25935–83. Приборы дозиметрические. Методы измерения основных параметров.
4. Баранова А.А. Дозиметрия : учебно-методическое пособие / А.А. Баранова, А.П. Оконечников, В.А. Пустоваров; Мин-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 112 с.
5. ГОСТ Р 8.736–2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
6. Приказ Росстандарта от 31 декабря 2020 г. № 2314 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы, амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы, мощности амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений».

ПЕРВОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ

Организационный комитет XV Всероссийской научно-технической конференции Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации» приглашает Вас принять участие в конференции, которая состоится с 20 по 22 ноября 2024 года в оздоровительном комплексе «Клязьма», расположенном в поселке Поведники Мытищинского района Московской области.

ОРГАНИЗАТОРЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



- Управление метрологии Вооруженных Сил Российской Федерации
- ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации (ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России)

Техническое обеспечение и организация проведения конференции

- ООО «ПРОМЭЛКОМ»

ОРГКОМИТЕТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ

- Подстреха Сергей Владимирович – начальник Управления метрологии ВС РФ

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ

- Мамлеев Тимур Фанильевич – начальник ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, к.т.н.
- Талалай Антон Валерьевич – председатель НТК (Метрологической службы ВС РФ)

ЧЛЕНЫ:

- Васильев Игорь Олегович – советник Департамента развития научно-производственной базы ЯОК Госкорпорации «Росатом», д.т.н.
- Донченко Сергей Иванович – генеральный директор ФГУП «ВНИИФТРИ», д.т.н.
- Клейменов Юрий Анатольевич – заместитель начальника ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (по научной работе), д.т.н.
- Кривов Анатолий Сергеевич – заместитель генерального директора АО НПФ «Диполь», председатель Межотраслевого совета по прикладной метрологии и приборостроению, д.т.н.
- Кузнецов Дмитрий Александрович – заместитель директора Департамента государственной политики в области технического регулирования, стандартизации и обеспечения единства измерений Минпромторга России

- Лазаренко Евгений Русланович – заместитель Руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии
- Подосинников Виталий Александрович – исполнительный директор ООО «ПРОМЭЛКОМ»

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- Клейменов Юрий Анатольевич – ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, д.т.н.
- Попенков Андрей Яковлевич – ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, к.т.н.
- Храменков Виктор Николаевич – ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, д.т.н.
- Щеглов Василий Андреевич – ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

1. Состояние и развитие законодательства об обеспечении единства измерений, нормативно-правовых и методических основ обеспечения единства измерений в войсках (силах) и организациях ОПК, метрологического обеспечения ВВСТ и процессов их создания и эксплуатации.
2. Совершенствование организационной структуры и деятельности метрологических служб и метрологических организаций (подразделений) Вооруженных Сил, других войск, воинских формирований и органов, организаций ОПК и Росстандарта, решающих задачи в области обороны и безопасности государства, повышение качества координации их деятельности.
3. Состояние и развитие технической базы метрологического обеспечения в области обороны и безопасности государства по всей номенклатуре единиц величин, диапазонам и точности измерений. Проблемные вопросы импортозамещения и развития отечественной приборостроительной отрасли.
4. Состояние работ по подготовке Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2035 года применительно к области обороны и безопасности государства.
5. Повышение эффективности системы обоснования, задания и оценки выполнения требований к метрологическому обеспечению образцов и комплексов ВВСТ, обязательной метрологической экспертизы и метрологической документации на них.
6. Состояние, особенности организации и функционирования системы испытаний, утверждения типа и поверки средств измерений и эталонов единиц величин в области обороны и безопасности государства. Проблемные вопросы и пути их решения.
7. Место и роль измерений параметров ВВСТ и процессов их создания, а также метрологического обеспечения измерений в создании результативных и эффективных систем менеджмента качества организаций ОПК и обеспечении качества выполнения заданий ГОЗ.

ФОРМЫ УЧАСТИЯ В КОНФЕРЕНЦИИ

- выступление с пленарным докладом
- выступление с секционным докладом
- очное участие в конференции без доклада
- участие в обсуждении докладов, представленных на конференции
- демонстрация экспонатов
- публикация рекламных материалов в сборнике материалов конференции
- заочное участие в конференции с публикацией научных материалов в сборнике материалов конференции (по решению Программного комитета)
- организация и проведение семинаров спонсорами конференции (по решению спонсоров конференции)

ВАЖНЫЕ ДАТЫ:

- **до 01 сентября 2024 г.** – направление регистрационной формы (заявки) для участия в конференции;
- **до 15 сентября 2024 г.** – направление тезисов докладов и рекламы в материалы конференции, а также предложений в проект решения и рекламных листов для вложения в раздаточный материал;
- **до 01 октября 2024 г.** – срок подачи заявок, оформления договоров и оплаты участия в конференции;
- **до 01 ноября 2024 г.** – формирование программы конференции;
- **20–22 ноября 2024 г.** – проведение Всероссийской научно-технической конференции.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Журналы «Вестник метролога», «Измерительная техника», «Альманах современной метрологии».
- Сайт ООО «ПРОМЭЛКОМ» (www.recomponent.ru)

РЕГЛАМЕНТ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Регистрация участников конференции – по месту проведения конференции 20 ноября 2024 г. с 8.00 до 10.00.
2. Пленарные заседания – 20 и 22 ноября 2024 года (в соответствии с Программой конференции).
3. Работа по секциям - 21 ноября 2024 года (в соответствии с Программой конференции).

Секция 1 «Развитие организационных и нормативных основ обеспечения единства измерений при осуществлении деятельности в области обороны и безопасности Российской Федерации».

Секретарь секции – Мотлич Павел Анатольевич, тел. 8–915–098–28–59

Секция 2 «Приоритетные направления развития технической базы метрологического обеспечения ВВСТ. Теоретические и технические проблемы обеспечения единства, требуемой точности, полноты и своевременности измерений в области обороны и безопасности Российской Федерации».

Секретарь секции – Усиков Валентин Дмитриевич, тел. 8–981–797–19–58.

4. Начало работы – 10.00

5. Время для презентации (включая ответы на вопросы) **пленарного доклада** – до 30 минут, **секционного** – до 15 минут.

6. Планируется:

заслушивание докладов приглашенных докладчиков на пленарных заседаниях;

проведение Круглого стола по обсуждению актуальных проблем метрологического обеспечения;

проведение семинаров спонсоров.

СТОИМОСТЬ УЧАСТИЯ В КОНФЕРЕНЦИИ

Участие в конференции – на возмездной основе:

- организационный взнос за каждого участника (стоимость различается для участников с проживанием и без проживания);
- оплата выставки экспонатов;
- оплата рекламных материалов в сборнике материалов конференции.

В стоимость участия входит:

- обеспечение информационными материалами, включая научно-технический сборник;
- техническое обеспечение выступлений, включая аренду помещений;
- питание (завтраки, обеды, ужины, кофе-брейки, товарищеский ужин);
- транспортное обеспечение;
- проживание в гостинице оздоровительного комплекса «Клязьма» (для желающих).

Особые условия:

В случае подачи заявки и оплаты участия в конференции после указанного в информационном сообщении срока, размещение с проживанием и питание не гарантируются.

Каждой организации-участнику конференции, представившей оформленный договор и акт сдачи-приемки работ, будут выданы счета-фактуры.

Стоимость участия в конференции, все организационные аспекты и требования к оформлению тезисов докладов для опубликования в сборнике материалов конференции будут доведены при рассылке приглашений к участию в конференции.

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.

Оттиски 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, учебного 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 подрисунковых 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/>

