

ВМ 3/2025 (Основан в 2005 году)

ВЕСТНИК МЕТРОЛОГА

Научно-технический журнал
Решением ВАК от 18.12.2017 года
включен в «Перечень рецензируемых
научных изданий, в которых должны
быть опубликованы основные научные
результаты диссертаций на соискание
ученой степени кандидата наук, на
соискание ученой степени доктора наук»
(«Перечень...» от 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:

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

Адрес для переписки, размещения
рекламы и приобретения журнала
«Вестник метролога»:
п/о Менделеево, Солнечногорский
район, Московская область, 141570

E-mail: 32gniii_vm@mail.ru

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

Сдано в набор 25.07.2025
Подписано в печать 20.08.2025
Тираж 300 экз.

*Зарегистрирован ISSN 2413–1806 в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций. Свидетельство о регистрации
ПИИ № 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., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны,
Храменков А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Организация и выполнение обеспечения единства измерений
параметров технических объектов 3

Малахов А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Московский политехнический университет,
Хайруллин Р.З., д.ф.-м.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет, ФГБУ «ГНМЦ»
Минобороны России,
Фуфаева О.В., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Попова Ю.С., к.э.н., ФГБОУ ВО «Технологический университет
имени дважды героя Советского Союза, летчика-космонавта
А.А. Леонова»
Метод характеристики закона распределения определяющего
параметра при проектировании метрологической техники 6

Щедрин А.Ю., младший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ»
Минобороны России
О реализации процедуры бездемонтажной поверки
пьезоэлектрических вибропреобразователей с внутренним
возбуждением деформации чувствительного элемента на месте
эксплуатации 12

Шпилевский О.Б., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Руденкова Е. Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Система обеспечения единства измерений в Китайской народной
республике 20

Болотнов А.С., аспирант кафедры «Технологии приборостроения»
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Кондрашкин Г.В., аспирант кафедры «Приборы и системы
ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Методика проверки точности определения курсового угла
астроинерциальной навигационной системы 23

Частотно-временные измерения

Фокин А.П., к.т.н., ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Фокина Н.Н., ФГБУ «ГНМЦ» Министерства обороны Российской
Федерации
Теоретические основы определения расширенного вектора
состояния движения потребителя через непрерывное измерение
ортогональных составляющих магнитного поля земли 28

Оптические и оптико-физические измерения величин

Васильев Д.Ю., Курт В.И., д.т.н., Егошин Д.А., АО «НПО ГИПО»,
г. Казань
Актуальные проблемы разработки устройств имитации фоно-
целевой обстановки на основе микрозеркальных матриц для
испытаний оптико-электронной аппаратуры 34

К сведению авторов 38

Новинки измерительной техники (ОБЛОЖКА)

VM 3/2025

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

«Vestnik Metrologa»

Scientific and technical journal

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

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

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

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

The Editorial advice:

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

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

S.S. Golubev, candidate of the technical
sciences

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

Y.A. Kleymenov, doctor of the technical
sciences

D.A. Kuznetsov

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

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

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

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

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

Editor-in-chief

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

Deputy main of the editor

O.V. Nadeina, candidate of the pedagogical
sciences

Address to editings: 141006, Mytischii
Moscow obl., Olympic avenue, possession
12, construction 1, of. 404

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

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, Khramenkov A.V., k.t.s., FSBI «MSHC» of
Russian Federation Ministry of Defense, Nadeina O.V., k.p.s., FSBI
«MSHC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation
Organization and performing the provision unity measurements
parameter technical object 3

Malakhov A. V., candidate of technical sciences, Federal State Budget
Institution «Main Scientific Metrological Center» of the Ministry of
Defense of the Russian Federation, Moscow Polytechnic University,
Khayrullin R. Z., doctor of physico-mathematical sciences, Federal
State Budget Institution «Main Scientific Metrological Center» of
the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow State
Technical University named after N.E. Bauman, Moscow State
University of Civil Engineering,
Fufaeva O. V., Federal State Budget Institution «Main Scientific
Metrological Center» of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
Popova YU. S., candidate of economical sciences, associate
professor, Technological University named after A.A. Leonov
Method of characterization of the law of distribution of the determining
parameter in the design tasks of complex technical systems 6

Shchedrin A.Yu., junior researcher, FSBI «MSMC» of Russia Ministry
of Defense
On the implementation of the non-dismountable verification procedure
piezoelectric vibration transducers with internal excitation of
deformation of the sensing element at the place of operation 12

Shpilevskiy O.B., FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense of the
Russian Federation,
Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense of
the Russian Federation
The system of ensuring the uniformity of measurements in the
People's Republic of China 20

Bolotnov A.S., Post-Graduate Student, Department of Instrument
Production Techniques, BMSTU,
Kondrashkin G.V., Post-Graduate Student, Department of Instruments
and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation, BMSTU
Methodology for accuracy checking of heading angle determining of a
stellar inertial navigation system 23

Time-frequency measurements

Fokin A.P., Military and Air academy of Zhukovsky and Gagarin
(VUNTs Air Force «VVA»)
Fokina N.N., Senior Research Officer, Federal State Budgetary
Institution «Main Scientific Metrological Center» of the Ministry of
Defense of the Russian Federation
Theoretical foundations for determining the extended vector of the
consumer's state of motion through continuous measurement of the
orthogonal components of the earth's magnetic field 28

Optic and optic-physical measurements

Vasilyev D.Y., Kurt V.I. (Doctor of Engineering Sciences),
Egoshin D.A. JSC «NPO GIPO», Kazan
Current issues in developing background simulation devices based on
micro-mirror arrays for testing optoelectronic equipment 34

NOTE AUTHORS 39

**ОРГАНИЗАЦИЯ И ВЫПОЛНЕНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
ORGANIZATION AND PERFORMING THE PROVISION UNITY MEASUREMENTS
PARAMETER TECHNICAL OBJECT**

Храменков В.Н., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны,
Храменков А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Khramenkov V.N., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation
Ministry of Defense, E-mail: 32gnii@mil.ru; tel. 8(985)765-66-75

Khramenkov A.V., k.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense, E-mail: 32gnii@mil.ru; tel.8(915)033-71-17
Nadeina O.V., k.p.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation E-mail: 32gnii@mil.ru; tel. 8(906)751-52-66

Аннотация: в статье рассматриваются обязательные метрологические требования по обеспечению единства измерений параметров технических объектов при их разработке и эксплуатации. Для установления требований к обеспечению единства измерений в процессе разработки и последующей правильной организации обеспечения единства измерений при их эксплуатации должны быть определены измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования (СГР) обеспечения единства измерений (ОЕИ) в соответствии с законодательством Российской Федерации в следующих формах: утверждения типа и поверки средств измерений, аттестации методик измерений (для СГР ОЕИ) или калибровку средств измерений (вне этой сферы).

Abstract: obligatory metrological requirements are considered in article on provision unity measurements parameter technical object under their development and usages. For determination of the requirements to provision unity measurements in process of the development and the following correct organization of the provision unity measurements under their usages must be determined measurements, referring to sphere of the government regulation (SGR) of the provision unity measurements (OEI) in accordance with legislation of the Russian Federation in the following forms: approving the type and checks of the facilities of the measurements, qualifications of the methods of the measurements (for SGR OEI) or calibration of the facilities of the measurements (outside of this spheres)

Ключевые слова: обязательные метрологические требования, технический объект, параметры, характеристика, измерения, контроль

Keywords: obligatory metrological requirements, technical object, parameters, feature, measurements, checking

Сфера государственного регулирования (СГР) обеспечения единства измерений (ОЕИ) установлена законодательством Российской Федерации (РФ) об ОЕИ, которая определяется Федеральным законом об обеспечении единства измерений [1], постановлением Правительства РФ [2] и другими нормативными актами по обеспечению единства измерений, и распространяется на измерения, к которым в целях защиты прав и законных интересов граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений предъявляются обязательные метрологические требования.

Обязательные метрологические требования включают также требования к характеристикам, влияющим на результат и показатели точности измерений параметров разрабатываемой

продукции, эталонов единиц величин, стандартных образцов, средств измерений, а также к условиям, при которых эти характеристики должны быть обеспечены, и которые устанавливаются нормативными правовыми актами, обязательными для соблюдения на территории Российской Федерации согласно [1].

В социально значимой области государства (здравоохранение, безопасность дорожного движения, государственные учетные операции, охрана окружающей среды и др.) Правительство РФ определяет Перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, и обязательные метрологические требования к ним [2].

В соответствии с [1] обязательные метрологические требования, устанавливающиеся

нормативными правовыми актами Российской Федерации, являются обязательными для соблюдения на ее территории и включают требования к влияющим на результат и показатели точности измерений характеристикам (параметрам) измерений, к эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений, а также к условиям, при которых эти характеристики (параметры) должны быть обеспечены.

В СГР, определяемой федеральными законами об ОЕИ, о техническом регулировании, основными процедурами ОЕИ являются испытания и утверждение типа средств измерений, поверка средств измерений, аттестация методик не прямых измерений, аккредитация на проведение испытаний средств измерений (СИ), их поверки, а вне этой сферы – калибровка СИ и аккредитация на калибровку средств измерений.

Для установления измерений, относящихся к СГР ОЕИ, и распространения на средства измерений в этой сфере процедур их испытаний, утверждения типа и поверки законодательством Российской Федерации об ОЕИ определены соответствующие процедуры как для социально-значимой области измерений, так и для области обороны государства. Согласно статье 1 Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» к СГР ОЕИ в организациях промышленности относятся измерения, к которым установлены обязательные метрологические требования, распространяющиеся на промышленность, предприятия которой выполняют разработку, производство и совершенствование разрабатываемой продукции.

Данная формулировка статьи 1, указанного Федерального закона [1], регулирующей осуществление деятельности по ОЕИ в области обороны и безопасности государства, однозначно определяет измерения, относящиеся к СГР ОЕИ.

Номенклатура измеряемых параметров конкретных видов и типов разрабатываемой продукции и процессов ее разработки, производства, испытаний и эксплуатации и обязательных метрологических требований к их измерениям устанавливаются в составе других

обязательных требований к разрабатываемой продукции (по стойкости, надежности, техническому обслуживанию и др.).

Система нормативных документов, устанавливающих обязательные метрологические требования к разрабатываемой продукции и связанным с ними процессам (включая номенклатуру измерений и обязательные метрологические требования к измерениям их параметров и средствам измерений) законодательно определена в соответствии с:

- статьей 1 (оценка соответствия обязательным требованиям) Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» [1];
- статьей 5 Федерального закона [3], устанавливающей особенности технического регулирования применительно к оборонной продукции и связанным с нею процессам;

- указом Президента РФ, наделившим полномочиями Минобороны России по установлению обязательных требований (включая обязательные метрологические требования) в области обороны государства.

В соответствии с этим указом Президента РФ Министерство обороны разрабатывает и устанавливает своими нормативными правовыми актами и технической документацией (конструкторской, технологической и программной документацией, техническими условиями и документами по стандартизации) обязательные требования в области технического регулирования к разрабатываемой продукции, а также связанным с нею процессам создания и ее эксплуатации, в том числе обязательные метрологические требования к измерениям параметров процессов и применяемым средствам измерений.

Обоснованность установления обязательных метрологических требований к измерениям и средствам измерений, а также отнесение таких измерений и средств измерений к СГР ОЕИ подтверждается результатами обязательной метрологической экспертизы и метрологической экспертизы, проводимыми в соответствии с установленным в [1] порядком.

При задании обязательных метрологических требований к разрабатываемой продукции руководствуются принципами системного подхода, при котором:

объектом обеспечения единства измерений являются измерения и СИ параметров разрабатываемой продукции и связанных с ней процессов ее проектирования, производства, испытаний и эксплуатации;

предметом – обеспечение их метрологического качества (единства измерений, точности и достоверности результатов измерений):

измерения параметров разрабатываемой продукции и процессов, и основанные на них испытания и контроль качества, СИ и испытательное оборудование (ИО) находятся вне обеспечивающей их метрологическое качество деятельности по обеспечению единства измерений.

Техническую основу измерений параметров разрабатываемой продукции и процессов образуют все виды военной измерительной техники, а испытаний разрабатываемой продукции – испытательное оборудование (ИО) и технические системы и комплексы полигонов (ТСКП). Техническую основу обеспечения единства измерений образуют все виды военной метрологической техники. При этом проводятся разграничения полномочий и ответственности подразделений, выполняющих измерения параметров разрабатываемой продукции и процессов, и применяющих для этого СИ, и метрологических служб, обеспечивающих метрологическое качество измерений и СИ.

Выполнение измерений, в том числе в составе контроля качества и испытаний разрабатываемой продукции, должно подтверждаться результатами обязательной метрологической экспертизы и метрологической экспертизы, организуемых в установленном порядке на определенных стадиях и этапах жизненного цикла разрабатываемой продукции [4].

Организационные основы обеспечения единства измерений (метрологические службы и метрологические воинские части, организации и подразделения) должны соответствовать ее технической основе – военной метрологической технике, состоящей из эталонов единиц величин, мобильных метрологических комплексов (ПЛИТ), рабочих мест поверителей, поверочных установок и вспомо-

гательного оборудования, применяемых при поверке СИ, и решении других задач ОЕИ.

К формам оценки соответствия разрабатываемой продукции относятся: измерения, испытания, контроль качества, контроль технического состояния, проверка, приемка, подтверждение соответствия, экспертиза и др. Система оценки соответствия продукции и процессов обязательным требованиям государственных заказчиков, основанная на измерениях и испытаниях, законодательно, нормативно и методически сложилась, имеет установленную организационную основу и техническую базу и для ОЕИ является объектом (измерения, испытания, контроль качества) и предметом (обеспечение метрологического качества измерений, составляющих основу оценки соответствия). При этом измерения параметров разрабатываемой продукции и процессов применяются как в качестве самостоятельной формы оценки соответствия, так и в составе других технических форм оценки соответствия.

Литература

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 02 октября 2009 г. № 780 «Об особенностях обеспечения единства измерений при осуществлении деятельности в области обороны и безопасности Российской Федерации» (с изменениями постановления Правительства РФ от 03 июня 2017 г. № 677).
3. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (статья 5 «Особенности технического регулирования в отношении оборонной продукции (работ, услуг), поставляемой по государственному оборонному заказу»).
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 11 октября 2012 г. № 1036 «Об особенностях оценки соответствия разрабатываемой продукции (работ, услуг), поставляемой по государственному оборонному заказу, процессов проектирования (включая изыскания), производства строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения указанной продукции».

МЕТОД ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ METHOD OF CHARACTERIZATION OF THE LAW OF DISTRIBUTION OF THE DETERMINING PARAMETER IN THE DESIGN TASKS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Малахов А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Московский политехнический университет,
Хайруллин Р.З., д.ф.-м.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,

Попова Ю.С., к.э.н., ФГБОУ ВО «Технологический университет имени дважды героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова»

Malakhov A. V., candidate of technical sciences, Federal State Budget Institution «Main Scientific Metrological Center» of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow Polytechnic University,

Khayrullin R. Z., doctor of physico-mathematical sciences, Federal State Budget Institution «Main Scientific Metrological Center» of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow State University of Civil Engineering,

Fufaeva O. V., Federal State Budget Institution «Main Scientific Metrological Center» of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

Popova YU. S., candidate of economical sciences, associate professor, Technological University named after A.A. Leonov, sanya-mal1@yandex.ru, +7 (919) 722-12-02

zrkzrk@list.ru, +7 (926) 405-22-17

fufaeva_ov@mail.ru, +7 (915) 357-88-38

yupopova@ut-mo.ru, +7 (909) 958-62-70

Аннотация: представлен метод характеристики закона распределения свойством максимума энтропии, предназначенный для моделирования определяющего параметра (случайной величины) многокомпонентной метрологической техники рассматриваемой с точки зрения сложных технических систем. Метод основан на вычислении вариации функции Лагранжа, включающего энтропию и ограничения, с последующим выводом и решением уравнений Эйлера для задачи построения закона распределения определяющего параметра сложной технической системы с учетом ограничений на ее компоненты. Метод целесообразно использовать на ранних этапах проектирования, когда информации о разрабатываемой системе и его компонентах крайне мало.

Abstract: a method for characterizing the distribution law by the property of maximum entropy is presented. It is intended for modeling the determining parameter (random variable) of multicomponent metrological techniques considered from the point of view of complex technical systems. The method is based on the calculation of the variation of the Lagrange function, including entropy and constraints, followed by the derivation and solution of the Euler equations for the problem of constructing the distribution law of the determining parameter of a complex technical system, taking into account the constraints on the components. The method is advisable to use at the early stages of design, when there is very little information about the system being developed and its components.

Ключевые слова: вероятностный анализ, сложная техническая система, проектирование, принцип максимума неопределенности.

Keywords: probabilistic analysis, complex technical system, design, maximum uncertainty principle.

На современном этапе развития техники и технологий прослеживается бурный рост сложности внутренней структуры сложных технических систем (СТС) [1–3] и расширение круга решаемых с помощью них прикладных задач. Под СТС понимается технический объект с установленным на нем измерительным комплексом или измерительная система, включающая несколько компонентов: технические блоки, средства измерений, вспомогательное оборудование и т.д. При разработке СТС, особенно на ранних этапах проектирования [4,5], когда достоверной информации о СТС крайне мало, приходится принимать управленческие решения при сильном дефиците

информации. Одним из возможных способов получения объективной информации о СТС может быть постановка и решение задач статистического оценивания параметров таких систем, с использованием вероятностно-статистических методов [6] без привлечения дополнительной информации в виде предположений, допущений и ограничений.

К настоящему времени накоплен большой опыт решения практических задач статистического оценивания [7–9]. Отметим методы и методики, используемые на ранних стадиях проектирования в станкостроении и машиностроении [10], ракетной и космической техники [11,12], приборостроении

[13]. Вместе с тем при проектировании многокомпонентных СТС, в том числе с метрологическим обеспечением [14,15], выявились существенные трудности, препятствующие применению описанных выше методов и методик.

Вот некоторые из них:

исходная информация, которую реально удастся собрать и подготовить на ранних этапах проектирования СТС для решения вероятностных задач, оказывается, как правило, неполной, неточной и, в высокой степени, неопределенной;

многокомпонентность СТС приводит к необходимости объединения разноаспектных представлений о системе в единое целое в компактной форме.

Для преодоления указанных трудностей необходимо разработать метод, пригодный для работы при дефиците информации и позволяющий строить модели проектируемой системы – функцию

плотности распределения определяющего параметра (ОП) СТС с учетом ограничений на параметры его компонентов.

Эти обстоятельства обуславливают необходимость постановки и исследования новых математических задач характеристики законов распределения и разработки алгоритмов их решения с учетом ограничения на величину и характер изменения ОП СТС.

Новизна представленного в статье метода характеристики состоит в возможности учета ограничений на разные компоненты СТС при построении функции распределения ОП СТС в целом.

Метод описания структурных схем СТС. Структурные схемы СТС могут включать такие фрагменты как последовательно соединенные элементы, параллельно соединенные элементы, разветвленные структуры в виде мостика и т.д.

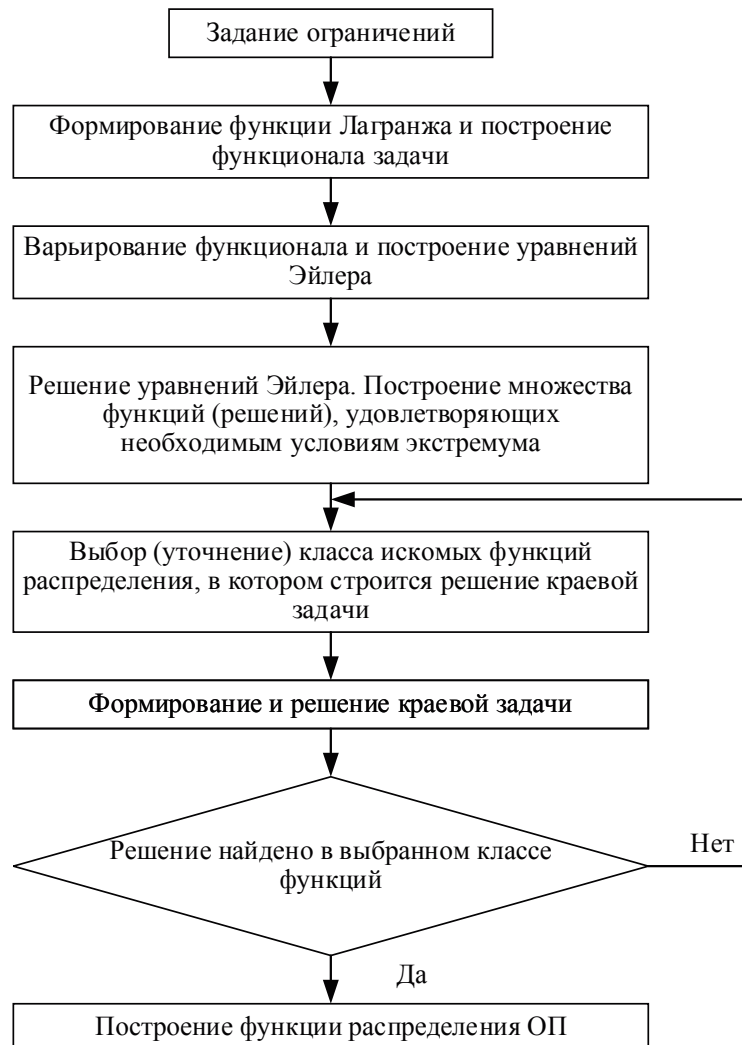


Рисунок 1 – Общая схема метода характеристики закона распределения ОП СТС

Аналитическое описание структурных схем СТС может быть построено на основе теорем умножения и сложения вероятностей, а также на основе зависимости:

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i) - \text{для последовательного соединения элементов};$$

нения элементов;

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1)P(A_2) - \text{для параллельного соединения элементов};$$

$$P(A) = \sum_{i=1}^n c_i [P(A_i)]^i [1 - P(A_i)]^{n-i} - \text{для разветвленной структуры, здесь } A \text{ и } A_i - \text{случайные события, характеризующие состояния СТС и ее элементов; } c_i - \text{число связей, образованных между двумя полюсами системы при условии, что } i \text{ элементов системы работоспособны.}$$

В настоящей работе будем рассматривать последовательные соединения элементов СТС, с помощью которых моделируются измерительные цепи, преобразователи, каналы связи и т.д.

Общая схема метода характеристики закона распределения ОП СТС. Метод является итерационным. Схема метода представлена на рисунке 1. Если на данной итерации поиска решения краевой задачи не удастся построить функцию распределения в выбранном классе функций, то класс функций необходимо расширить. Обычно используется такая последовательность: непрерывные гладкие функции распределения на всем диапазоне изменения ОП СТС, непрерывные функции распределения, кусочно-непрерывные функции с ограниченной производной, кусочно-непрерывные с неограниченной производной и т.д.

Принцип максимума неопределенности. В соответствии с принципом максимума неопределенности (принципом максимума энтропии Джейнса) [6,16] энтропия:

$$H = - \int_0^{\infty} f(x) \ln f(x) dx$$

должна принимать максимальное значение. Одновременно должны выполняться ограничения на искомую функцию $f(x)$ и характер ее изменения.

Алгоритм построения функции распределения ОП СТС.

Пусть СТС моделируется последовательным соединением n элементов, часть из которых мо-

делирует объект, на котором установлен измерительный комплекс, а другая часть – сам измерительный комплекс.

1. Пусть область значений ОП i – того элемента СТС:

$$x_{k0}^{(i)} \leq x < x_{k1}^{(i)},$$

$i=1, 2, \dots, n$, нижние индексы $k0$ и $k1$ соответствуют наименьшему и наибольшему возможному значению ОП. Отложим на горизонтальной оси эти значения для всех i . Тогда множество возможных значений ОП СТС разобьется на S участков: $x_{s-1} \leq x < x_s$, $s=1, 2, \dots, S$, на которых функция распределения $F(x)$ будет непрерывна, а функция плотности распределения $f(x)$ может иметь изломы на границах этих участков. Количество участков S зависит от взаимного расположения $x_{k0}^{(i)}, x_{k1}^{(i)}$. Так, например, для $i=2$ количество участков непрерывности, включая начальный участок, на котором функция распределения равна нулю, и конечный участок, на котором функция распределения равна единице, $\hat{S} \leq 4$; для $i=3$ имеем $\hat{S} \leq 6$; а для $i=5$ имеем $\hat{S} \leq 13$.

2. На каждом участке $x_{s-1} \leq x < x_s$ функция распределения $F(x)$ может быть представлена как произведение некоторого количества функций распределения элементов:

$$F(x) = F_{i1}(x) F_{i2}(x) \dots F_{in}(x).$$

3. Для каждого участка $x_{s-1} \leq x < x_s$ составляется дифференциальное уравнение и находится решение, зависящее от произвольных постоянных.

4. Формируется и решается краевая задача, в которой в качестве краевых условий используются условия Эрмана-Вейерштрасса [16] на границах участков $x_{s-1} \leq x < x_s$, условия нормировки функции распределения, изопериметрического условия и ограничения на статистические моменты элементов СТС.

5. Дается построение функции распределения ОП СТС как составной функции:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & , \quad x < x_0 \\ F_1(x) & , \quad x_0 \leq x < x_1 \\ \dots & , \quad \dots \\ F_S(x) & , \quad x_{S-1} \leq x < x_S \\ 1 & , \quad x \geq x_S \end{cases}.$$

Отметим, что не все

$$\{F_s(x), s=1, 2, \dots, S\}$$

задаются аналитическими формулами. Часть из них могут быть заданы с помощью обратных функций, специальных математических функций или с помощью рядов Ли [16].

Пример 1. Пусть СТС моделируется двумя элементами, соединенными последовательно. Известно среднее время работы:

$$t_{cp1} = \int_0^{t_{k1}} t dF_1,$$

$$t_{cp2} = \int_0^{t_{k2}} t dF_2$$

и предельное время работы: t_{k1} , t_{k2} для каждого элемента, причем $t_{k1} > t_{k2}$. Требуется найти закон распределения $F(t)$ времени работы СТС.

Решение. Обозначим законы распределения времени работы элементов $F_1(t)$ и $F_2(t)$. Тогда $F(t) = F_1(t)F_2(t)$. Дифференциальное уравнение на отрезке времени $0 \leq t \leq t_{k2}$ принимает вид:

$$F\ddot{F}^2 - \dot{F}^2 v_1 v_2 = 0.$$

Отметим, что $F = \text{const}$ является решением уравнения. Общее решение для $F_1(t)$ удастся получить лишь в неявном виде:

$$\frac{\sqrt{F_1}}{\sqrt{v_1 v_2}} - \frac{1}{2v_1 v_2} \ln \left| \sqrt{F_1} - \frac{1}{2\sqrt{v_1 v_2}} c_3 \right| = t + c_4.$$

Дифференциальное уравнение на отрезке времени $t_{k2} < t \leq t_{k1}$ принимает вид:

$$\ddot{F}_2 - \dot{F}_2 v_3 = 0.$$

Общее решение удастся получить в явной форме:

$$F_2 = \frac{c_{11}}{v_3} e^{v_3 t} + c_2.$$

Отметим, что в целом закон распределения $F(t) = F_1(t)F_2(t)$ получен в неявном виде. Он содержит 6 констант: c_2 , c_3 , c_4 , c_{11} , v_3 , $v^* = v_1 v_2$, которые находятся из решения системы алгебраических уравнений 6 порядка:

$$F(0) = 0, F(t_{k1}) = 1,$$

$$f_1(t_{k2}) = f_2(t_{k2}),$$

$$\int_0^{t_{k1}} t f_1(t) dt = M_1,$$

$$\int_0^{t_{k2}} t f_2(t) dt = M_2,$$

$$[v_1 t]_- = [v_3 t]_+$$

с использованием метода Ньютона. Последнее уравнение – это условие разрыва функции $f(x)$ при $t = t_{k2}$. На рисунке 2 показаны функции распределения каждого элемента СТС: $F_1(t)$ и $F_2(t)$, а также функция распределения последовательного соединения двух элементов:

$$F(t) = F_1(t)F_2(t).$$

Отметим, что функция $F(t)$ имеет излом в точке t_{k2} , а функция

$$f(t) = \dot{F}(t)$$

претерпевает разрыв в этой точке.

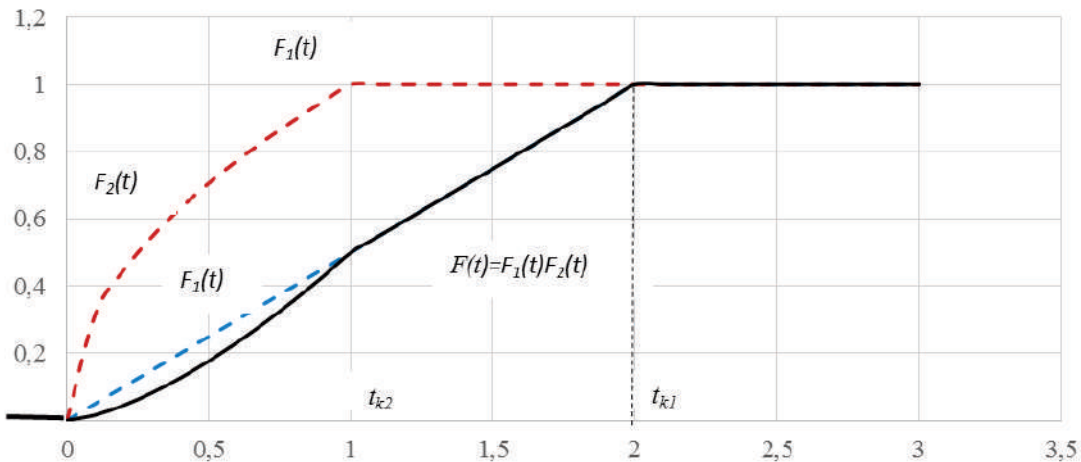


Рисунок 2 – Функции распределения для последовательного соединения двух элементов

Пример 2. СТС моделируется большим количеством n однотипных первичных преобразователей (датчиков), соединенных последовательно. Известно среднее и предельное время работы одного преобразователя: t_{cp} и t_k соответственно. Требуется найти предельный (при $n \rightarrow \infty$) закон распределения времени работы t всей системы $F(t)$.

Решение. Пусть закон распределения времени работы одного преобразователя $F_1(t)$. Тогда $F(t) = F_1^n(t)$.

Заметим, что вид закона распределения $F_1(t)$ неизвестен, известным является лишь математическое ожидание:

$$t_{cp} = \int_0^{t_k} t dF_1$$

Тогда дифференциальное уравнение имеет вид:

$$F^{1-1/n} \ddot{F} = \dot{F} \nu.$$

При $n \rightarrow \infty$ это уравнение упрощается:

$$\ddot{F} = \nu \frac{\dot{F}}{F}.$$

Отметим, что $F = \text{const}$ является решением уравнения. Интегрируя последнее уравнение, найдем еще нетривиальное решение: $\dot{F} = \nu \ln F + c$. Учитывая, что $F(t_k) = 1$, можно найти постоянную интегрирования $c = \dot{F}(t_k)$. Разделив переменные:

$$\frac{dF}{\nu \ln F + c} = dt,$$

найдем в результате интегрирования функцию, обратную искомой функции распределения:

$$t = \frac{1}{\nu} e^{-c/\nu} E_i \left(\ln F - \frac{c}{\nu} \right),$$

где $E_i(x)$ – интегральная показательная функция (специальная математическая функция).

Расчеты показали, что $\nu < 0$, а значение плотности распределения на левом конце области определения:

$$f(0) = \dot{F}(0) + \infty,$$

то есть график функции касается вертикальной оси при $t=0$.

Пример 3. Пусть одна случайная величина T распределена равномерно на отрезке $[a, b]$; кроме того, известно математическое ожидание m другой случайной величины, закон распределения которой $F(t)$ неизвестен. Найти закон распределения $F(t)$:

$$F(t) = F_1(t) \frac{t-a}{b-a}.$$

Решение. Дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\ddot{F}(t) - \dot{F} \frac{\nu(b-a)}{t-a} = 0,$$

где ν – неопределенный множитель Лагранжа.

Отметим, что $F = \text{const}$ является решением уравнения. Нетривиальное решение можно найти, разделив переменные и интегрируя последовательно:

$$f(t) = \dot{F}(t) = c(t-a)^{\nu(b-a)}; F(t) = \frac{c(t-a)^{\nu(b-a)+1}}{\nu(b-a)+1}.$$

Для определения множителя Лагранжа ν и постоянной интегрирования c необходимо использовать условие нормировки функции плотности распределения на единицу и уравнение для первого момента (математического ожидания):

$$1 = \frac{c(b-a)^{\nu(b-a)+1}}{\nu(b-a)+1},$$

$$m = \int_a^b xc(b-a)^{\nu(b-a)} dx.$$

Решая эту систему нелинейных алгебраических уравнений, получим:

$$c = \frac{m}{(1+ab-a^2)(b-a)^{m(1+ab-a^2)}},$$

$$\nu = \frac{m(1+ab-a^2)-1}{b-a}.$$

Отметим, что в примере 3, в отличие от примеров 1 и 2, закон распределения получен в явном виде.

В примерах 1–3 получены решения задачи в предположении, что время работы элементов СТС ограничено: $0 \leq t < t_k$. Если отказаться от этого ограничения, приняв $t_k \rightarrow \infty$, и использовать только ограничение на статистический момент первого порядка, то закон распределения ОП одноэлементной СТС будет экспоненциальным. А если дополнительно учитывать статистический момент первого порядка от логарифма случайной величины, то закон распределения ОП одноэлементной СТС будет описываться функцией гамма-распределения.

Разработанный алгоритм имеет методологическое значение, поскольку обобщает известные методы вероятностного анализа и теории надежности. Его применение для простейших структурных элементов СТС позволяет получать общеизвестные и широко используемые законы распределения: экспоненциальный, нормальный, равномерный и т.д.

Применение метода в задачах проектирования многокомпонентных СТС позволило получить новые законы распределения и, как следствие, получить новые знания.

Несмотря на то, что разработанный алгоритм является достаточно трудоемким, это не является препятствием для его эффективного использования, поскольку при использовании современных математических пакетов, таких как *Matematica*, решение дифференциальных уравнений затруднений не вызывает.

В статье приведены примеры для случая последовательного соединения элементов СТС. Представленный метод характеристики может быть применен для параллельного соединения элементов СТС и для разветвленных структур.

Моделирование показало, что последовательное применение разработанного метода на разных последовательных этапах проектирования СТС позволяет производить поэтапное уточнение вида закона распределения ОП СТС. Результаты уточнения могут служить основой для внесения корректив как в содержание этапов проектирования, так и в программы испытаний СТС.

Литература

1. Супрунук В.В., Кувыкин Ю.А., Щедрин А.Ю., Горбачев А.А. О метрологическом самоконтроле измерительных систем // Вестник метролога, 2023, № 4. С. 5–9.
2. Голик А.М., Шишов Ю.А., Клейменов Ю.А., Бобов С.Ю. Встроенный контроль характеристик диаграммы направленности цифровой антенной решетки мобильного радиолокационного комплекса // Вестник метролога, 2021, № 3. С. 3–8.
3. Ташевский А.Г. Математические модели продолжительности жизненного цикла технических систем // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2014, № 1 (190). С. 169–178.
4. Ershov D. S., Malakhov A. V., Talalai A. V., Khayrullin R. Z. Analysis of operation models of complex

- technical systems, *Measuring Techniques*, 2023, no. 9. pp. 15–23. doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02248-z>.
5. Боейко О.А., Попова Ю.С., Хайруллин Р.З. К проектированию сложных технических систем с метрологическим обеспечением // Известия ТулГУ, 2024, № 7. С. 92–97.
6. Вентцель Е. С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Москва. КноРус, 2014. 448 с.
7. Khayrullin R.Z., Zenger A.S. To the question of increasing the reliability of measurements on the basis of application of Bayesian approach. VI-международной научно-технической конференция Радиотехника, Радиотехника и Энергетика (REEPE – 2024) <https://ieeexplore.ieee.org/document/10479565> DOI: 10.1109/REEPE60449.2024.10479565
8. Yang H., Ke J., Ye J., A universal distribution law of network detour ratios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 96, pp. 22–37, 2018, doi: 10.1016/j.trc.2018.09.012.
9. Eroshok I. D., Bolnokin V. E., Mutin D. I., Hai D. M. Algorithms for statistical estimation of extreme values of the performance criteria for new projects, *AIP Conf. Proc.*, vol. 2402, Art. no 070007, 2021, doi: 10.1063/5.0071424.
10. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.; Машиностроение, 1984. 312 с.
11. Khabarov S.S., Komshin A.C. Fiber-optic measurement technology and the phase-chronometric method for controlling and monitoring the technical condition of aircraft structures, *Measurement Techniques*, vol. 64, no. 2, pp. 131–138, 2021, doi: 10.1007/s11018-021-01907-3.
12. Волков Е.Б., Судаков Р.С., Сырыцин Т.А. Основы теории надежности ракетных двигателей. М.; Машиностроение, 1974.
13. Стяжкин В.А., Хайруллин Р.З. Корреляция математической и эмпирической моделей поля ионизирующих излучений дозиметрической установки удп-интер // Вестник метролога, 2024, № 3. С.14–19.
14. Lavrik E., Frankenfeld U., Mehta S., Panasenکو I., Schmidt H. High-precision contactless optical 3D-metrology of silicon sensors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 935, pp. 167–172, 2019, doi: 10.1016/j.nima.2019.04.039.
15. Хайруллин Р.З. Формирование порядковых статистик для задач построения оценок погрешности измерений в условиях малых выборок // Научно-технический вестник Поволжья, 2023, № 9. С. 50–54.
16. Мартыщенко Л.А., Панов В.В. Методы военно-научных исследований в задачах разработки и испытания вооружения. Часть 1. Москва, 1981. 125 с.

**О РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ БЕЗДЕМОНТАЖНОЙ ПОВЕРКИ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВИБРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ВНУТРЕННИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДЕФОРМАЦИИ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ON THE IMPLEMENTATION OF THE NON-DISMOUNTABLE VERIFICATION PROCEDURE PIEZOELECTRIC
VIBRATION TRANSDUCERS WITH INTERNAL EXCITATION OF DEFORMATION OF THE SENSING ELEMENT
AT THE PLACE OF OPERATION**

Щедрин А.Ю., младший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Shchedrin A.Yu., junior researcher, FSBI «MSMC» of Russia Ministry of Defense,
e-mail: alexnemo28@yandex.ru,
tel. 8(961)030-56-53

Аннотация: рассмотрены существующие подходы к определению метрологических характеристик перспективных пьезоэлектрических вибропреобразователей с внутренним возбуждением деформации чувствительного элемента на месте их эксплуатации (в рамках процедуры поверки) и определены их недостатки. Разработана методика определения метрологических характеристик вибропреобразователей без демонтажа с объекта установки на основе комбинированного применения методов замещения напряжения и взаимности. Проведена экспериментальная апробация разработанной методики. Рассчитаны значения основной относительной погрешности вибропреобразователя при определении его метрологических характеристик по разработанной методике.

Abstract: The existing approaches to determining the metrological characteristics of promising piezoelectric vibration transducers with internal excitation of the sensor element deformation at the place of their operation (as part of the verification procedure) are considered and their disadvantages are identified. A method has been developed for determining the metrological characteristics of vibration transducers without dismantling from the installation site based on the combined use of stress substitution and reciprocity methods. An experimental approbation of the developed methodology has been carried out. The values of the basic relative error of the vibration transducer are calculated when determining its metrological characteristics according to the developed methodology.

Ключевые слова: пьезоэлектрический вибропреобразователь с внутренним возбуждением деформации чувствительных элементов, бездемонтажная поверка, метод взаимности, метод напряжения замещения.

Keywords: piezoelectric vibration transducer with internal excitation of deformation of sensitive elements, installation-free verification, reciprocity method, substitution stress method.

В современных пространственно-распределенных системах измерений параметров вибрации (ИС) установок, оборудования и корпусных конструкций ответственных объектов в качестве первичных измерительных преобразователей (ПИП) применяются перспективные пьезоэлектрические вибропреобразователи (ВП) с внутренним возбуждением деформации (ВВД) чувствительных элементов (ЧЭ). Отличительной особенностью конструкции рассматриваемых ВП является наличие двух одиночных пьезоэлектрических ЧЭ или пакетов ЧЭ, как правило, в форме диска, один из которых работает в режиме прямого пьезоэффекта, а другой – в режиме обратного пьезоэффекта [1, 2]. В зависимости от модели ВП, ЧЭ могут быть разделены инерционной массой, соединительным стержнем или не иметь разделения. Расположение ВП на объекте эксплуатации определяется необходимостью его установки на корпус объекта в непосредственной близости

от источников вибрации. Доступ к ВП при такой установке часто бывает ограничен или отсутствует, что значительно осложняет или делает невозможным демонтаж ВП для поверки. В связи с этим, задача определения метрологических характеристик (МХ) ВП без демонтажа с объекта установки является актуальной.

Проведённый анализ существующих подходов к определению МХ ВП без демонтажа с объекта установки, в том числе с одним ЧЭ, изложенных в патентах на изобретения и полезные модели ВП [3–11], методиках поверки ИС с такими ВП [12, 13] и общих методах поверки ВП [14–16] выявил следующие недостатки [2]:

- МХ ВП определяются только в нормальных условиях эксплуатации при неработающем объекте установки (при отсутствии вибрации объекта);

- традиционное применение электрического гармонического сигнала для ВВД ЧЭ сопровождается значительными временными затратами

ми на реализацию процедуры определения МХ, что в свою очередь требует обеспечения нормальных условий эксплуатации в течение длительного времени и остановки работы объекта установки;

- применение сигнала в форме меандра (последовательности прямоугольных импульсов) с фиксированной частотой следования импульсов для ВВД ЧЭ, в отличие от применения гармонического сигнала, позволяет сократить временные затраты на реализацию процедуры определения МХ, но при этом не охватывает весь нормированный рабочий диапазон частот ВП.

- отсутствуют результаты экспериментальных исследований, позволяющие оценить все составляющие суммарной погрешности ВП, связанные с применением рассматриваемых подходов, при этом МХ ЧЭ, используемого в качестве источника вибрации, не нормируются.

Для устранения указанных выше недостатков, разработана методика определения МХ ВП без демонтажа с объекта установки на основе комбинированного применения модифицированных автором методов замещения напряжения и взаимности. Отличительными особенностями указанной методики являются:

1. При реализации метода взаимности используются только два ЧЭ, попеременно работающие в режиме прямого и обратного пьезоэффекта, в отличие от стандартизованного подхода [15].

2. Установлена взаимосвязь между входным напряжением ЧЭ и формируемым им вибро-

ускорением при работе ЧЭ ВП в режиме обратного пьезоэффекта с применением метода замещения напряжения. Установление взаимосвязи требует определения не нормируемых ранее дополнительных МХ, как обратного коэффициента преобразования (КП), неравномерности частотной характеристики (ЧХ) обратного КП ВП и нелинейности амплитудной характеристики (АХ) обратного КП ВП.

3. В качестве сигнала ВВД, вместо гармонического сигнала или сигнала в форме меандра, применен **широкополосный сигнал**, что позволяет сократить время определения МХ в 3–5 раз [17].

4. Разработана дополнительная процедура обязательного определения МХ ВП на месте установки перед вводом объекта в эксплуатацию для учета влияния емкости и сопротивлений коммутационных линий связи объекта на результаты измерений.

5. Реализована процедура определения МХ ВП на месте установки в рабочих условиях при превышении уровня вибрации ЧЭ, работающего в режиме обратного пьезоэффекта, над уровнем вибрации объекта на 20 дБ и более.

6. Определены МХ ВП при его эксплуатации с каждым ЧЭ, в режиме прямого пьезоэффекта, что позволяет использовать и первый и второй ЧЭ для измерений параметров вибрации объекта (дублирование измерений)

Реализация данной методики определения МХ ВП осуществляется следующим образом. В рамках **первичной поверки** ВП его МХ определяются в три этапа, первые два из которых

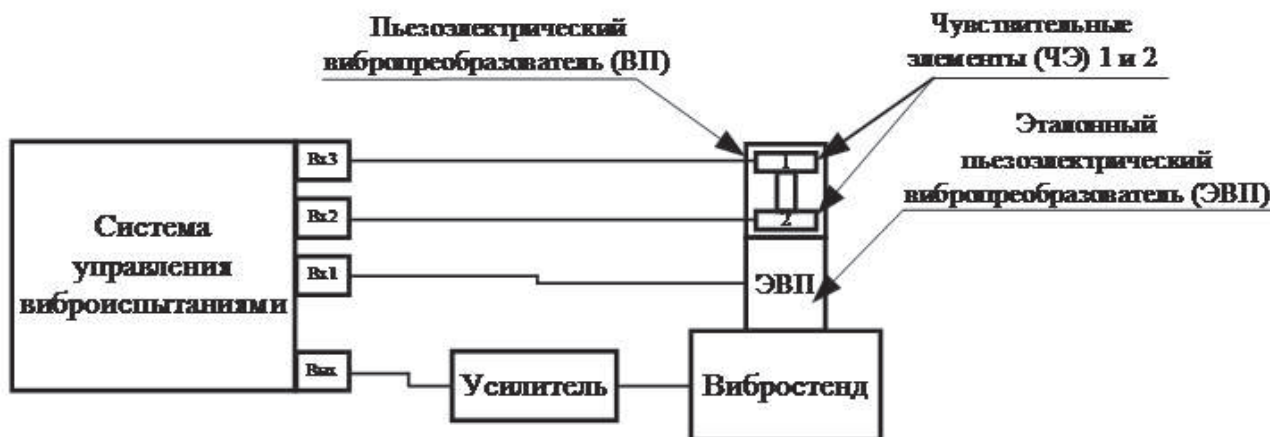


Рисунок 1 – Схема определения МХ ВП на первом этапе первичной поверки

- в лабораторных условиях, третий – на месте установки. Значения всех МХ на каждом этапе заносятся в паспорт ВП. При этом процедура определения МХ ВП при **периодической поверке** должна полностью совпадать с процедурой определения МХ на третьем этапе первичной поверки.

На первом этапе первичной поверки определяются все МХ ВП в соответствии с ГОСТ Р 8.669–2009 [14], при его эксплуатации – с первым и вторым ЧЭ.

Схема определения МХ приведена на рисунке 1.

На втором этапе первичной поверки ВП определяются следующие дополнительные МХ, при эксплуатации ВП – с первым и вторым ЧЭ:

- $S_{(1,2)}$ – обратные КП, м·с⁻²/мВ;
- $\gamma_{s(1,2)}$ – неравномерности ЧХ обратного КП, %;
- $\delta_{as(1,2)}$ – нелинейности АХ обратного КП, %;
- $J_{(1,2)}$ – коэффициенты взаимности.

Схема определения дополнительных МХ приведена на рисунке 2.

Обратные КП рассчитываются по формулам (1) и (2), полученным на основе формул приведенных в [2]:

$$S_{(1)} = \frac{U_{\text{вых.}(2)}}{(U_{\text{вх.}(1)} \cdot K_{(2)})} \quad (1)$$

$$S_{(2)} = \frac{U_{\text{вых.}(1)}}{(U_{\text{вх.}(2)} \cdot K_{(1)})}, \quad (2)$$

где $U_{\text{вых.}(1)}$ и $U_{\text{вых.}(2)}$ – выходные напряжения первого и второго ЧЭ ВП, мВ; $U_{\text{вх.}(1)}$ и $U_{\text{вх.}(2)}$ – входное напряжение первого и второго ЧЭ ВП, мВ; $K_{(1,2)}$ и $K_{(2,1)}$ – значения КП ВП при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ, мВ/м·с⁻².

Величина напряжения, подаваемого на один из ЧЭ, определяется величиной виброускорения, измеренного вторым ЧЭ, которое не должно выходить за пределы динамического диапазона ВП.

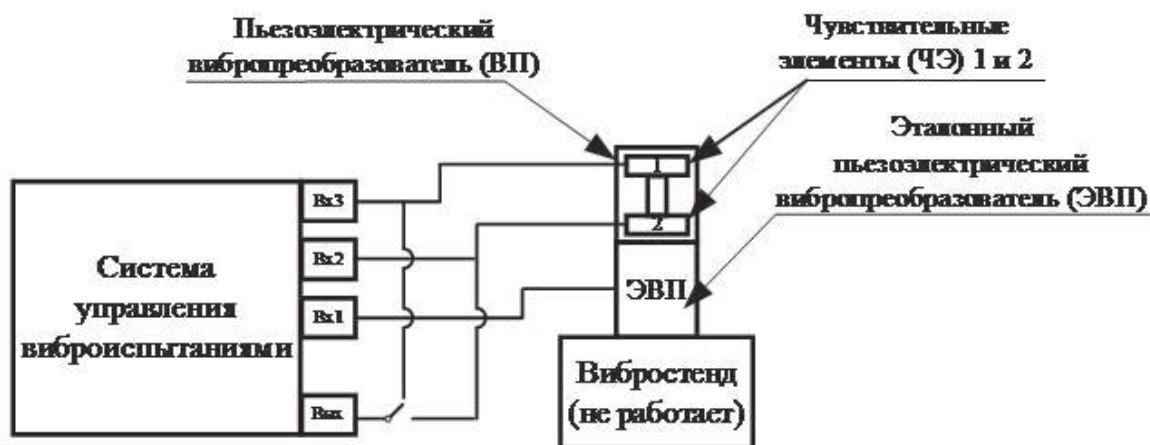


Рисунок 2 – Схема определения дополнительных МХ ВП на втором этапе первичной поверки

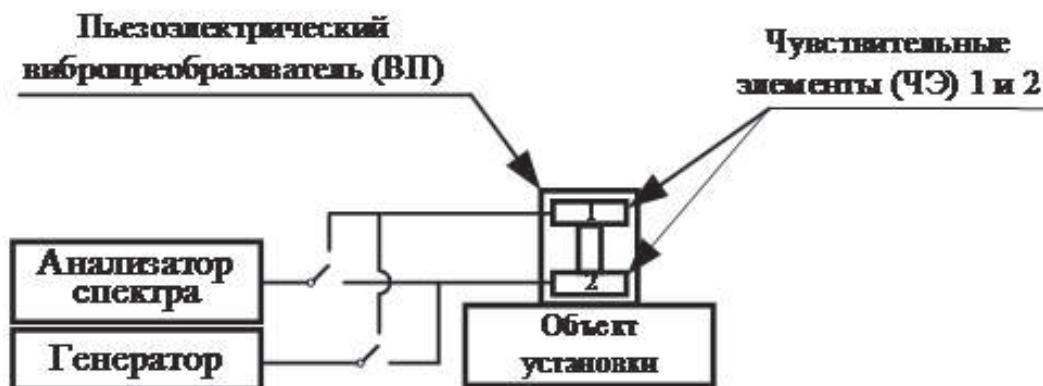


Рисунок 3 – Схема определения МХ ВП на месте эксплуатации

Значения неравномерностей ЧХ обратного КП $\gamma'_{s(1,2)}$ и нелинейностей АХ обратного КП $\delta'_{as(1,2)}$ рассчитываются по формулам, приведенным в п. 10.13 и 10.14 ГОСТ Р 8.669–2009 [14].

Коэффициенты взаимности $J_{(1,2)}$ рассчитываются как отношение КП ВП $K_{(1,2)}$ к обратным КП $S_{(1,2)}$.

На **третьем этапе первичной поверки** определяются следующие МХ ВП при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ:

- $K'_{(1,2)}$ – КП, мВ/м·с⁻²;
- $\gamma'_{(1,2)}$ – неравномерности ЧХ КП, %;
- $\delta'_{(1,2)}$ – основные относительные погрешности ВП, %.

Помимо вышеизложенных МХ, для расчёта значений КП ВП при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ по результатам измерений входных и выходных напряжений ЧЭ определяются следующие вспомогательные расчетные коэффициенты:

- N_K – коэффициент, характеризующий отклонение значения КП ВП при его эксплуатации с первым ЧЭ $K_{(1)}$ относительно значения КП ВП при его эксплуатации со вторым ЧЭ $K_{(2)}$;
- $L_{(12)}$ – коэффициент, характеризующий взаимосвязь между КП ВП при его эксплуатации с первым ЧЭ $K_{(1)}$ и обратными КП ВП при его эксплуатации со вторым ЧЭ $S_{(2)}$;
- $L_{(21)}$ – коэффициент, характеризующий взаимосвязь между КП ВП при его эксплуатации со вторым ЧЭ $K_{(2)}$ и обратными КП ВП при его эксплуатации с первым ЧЭ $S_{(1)}$.

Схема определения МХ приведена на рисунке 3.

Коэффициент N_K рассчитывается как отношение выходного напряжения первого ЧЭ $U_{\text{вых.}(1)}$ к выходному напряжению второго ЧЭ $U_{\text{вых.}(2)}$, при условии воздействия на ВП виброускорения заданной амплитуды и частоты. Виброускорение формируется одним из ЧЭ, работающим в режиме обратного пьезоэффекта [9, 10, 16].

Поскольку ЧЭ соединены между собой, значение виброускорения, формируемое одним ЧЭ, работающим в режиме обратного пьезоэффекта, и измеряемое другим ЧЭ, работающим в режиме прямого пьезоэффекта, равны между собой. С учетом этого коэффициенты $L_{(12)}$ и $L_{(21)}$ определяются выражениями (3) и (4):

$$L_{(12)} = K_{(1)} \cdot S_{(2)} = \frac{U_{\text{вых.}(1)}}{U_{\text{вх.}(2)}} \quad (3)$$

$$L_{(21)} = K_{(2)} \cdot S_{(1)} = \frac{U_{\text{вых.}(2)}}{U_{\text{вх.}(1)}} \quad (4)$$

где $U_{\text{вых.}(1)}$ и $U_{\text{вых.}(2)}$ – выходные напряжения первого и второго ЧЭ ВП, мВ; $U_{\text{вх.}(1)}$ и $U_{\text{вх.}(2)}$ – входное напряжение первого и второго ЧЭ ВП, мВ.

Используя значения коэффициентов взаимности $J_{(1,2)}$, определенных на втором этапе, и значения вспомогательных коэффициентов N_K , $L_{(12)}$, $L_{(21)}$, рассчитываются значения КП ВП при его эксплуатации с каждым ЧЭ по формулам (5) и (6):

$$K'_{(1)} = \sqrt{L_{(12)} \cdot N_K \cdot J_{(2)}} \quad (5)$$

$$K'_{(2)} = \sqrt{\frac{L_{(21)} \cdot J_{(1)}}{N_K}} \quad (6)$$

Значения неравномерностей ЧХ $\gamma'_{(1,2)}$ рассчитываются по формуле, приведенной в п. 10.13 ГОСТ Р 8.669–2009 [14].

Границы основной относительной погрешности ВП $\delta'_{(1,2)}$, %, при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ без демонтажа с объекта установки определяют по формулам (7) и (8):

$$\delta'_{(1)} = 1,1 \cdot \sqrt{\delta_0^2 + \Delta_{\text{ИС}}^2 + \delta_{a(1)}^2 + (\gamma'_{(1)})^2 + \gamma_{s(2)}^2 + \delta_{as(2)}^2 + \Delta_B^2} \quad (7)$$

$$\delta'_{(2)} = 1,1 \cdot \sqrt{\delta_0^2 + \Delta_{\text{ИС}}^2 + \delta_{a(2)}^2 + (\gamma'_{(2)})^2 + \gamma_{s(1)}^2 + \delta_{as(1)}^2 + \Delta_B^2} \quad (8)$$

где δ_0 – относительная погрешность эталонного ВП, %; $\Delta_{\text{ИС}}$ – относительная погрешность, обусловленная наличием совместного поперечного движения первого и второго ЧЭ, %, рассчитываемая как произведение относительных коэффициентов поперечного преобразования ВП при его эксплуатации с первым $K_{\text{оп}(1)}$ и вторым ЧЭ $K_{\text{оп}(2)}$, деленное на сотню; Δ_B – относительная погрешность измерения входных и выходных напряжений первого и второго ЧЭ анализатором спектра.

Разработанная формула расчёта относительной погрешности ВП в сравнении с классической формулой (п. 10.17.3 ГОСТ Р 8.669–2009 [14]) имеет следующие отличия:

1. Относительная погрешность Δ_{Π} (%), обусловленная наличием поперечного движения вибростола вибростенда, заменена на относительную погрешность $\Delta_{\Pi S}$ (%), которая обусловлена наличием поперечного совместного движения двух ЧЭ в связи с использованием в качестве источника вибрации ЧЭ вместо вибростенда.

2. Относительная погрешность $\Delta_{\text{кг}}$ (%), обусловленная наличием высших гармонических составляющих в законе движения вибростола вибростенда, исключена по следующим причинам:

- расположение двух ЧЭ в непосредственной близости друг от друга позволяет при использовании их для воспроизведения вибрации значительно сократить время переходного процесса, который является главной причиной возникновения гармонических искажений;

- применение анализатора спектра для измерения входных и выходных напряжений первого и второго ЧЭ позволяет отделить сигнал основной частоты от гармонических искажений.

3. В связи с использованием в качестве источника вибрации ЧЭ в формулу относительной погрешности включены составляющие, характеризующие их работу в режиме обратного пьезоэффекта:

- $\delta_{\text{ас}}$ – нелинейность АХ обратного КП, %;
- $\gamma_{\text{с}}$ – неравномерность ЧХ обратного КП, %.

Все указанные выше составляющие основной относительной погрешности ВП, включенные в классическую формулу, обусловлены применяемыми методами определения МХ.

Для апробации разработанной методики был проведен измерительный эксперимент **на опытном образце модифицированного акселерометра пьезоэлектрического АП-11УС.**

Перечень средств измерений (далее – СИ) и эталонов, участвующих в измерительном эксперименте, приведен в таблице 1.

На первом этапе первичной поверки, используя систему ВС-321 и акселерометр 8305, в соответствии с ГОСТ Р 8.669–2009 [14] были определены следующие МХ ВП типа АП-11УС при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ:

- коэффициенты преобразований $K_{(1,2)}$ (мВ/м·с⁻²);
 - относительные коэффициенты поперечного преобразования $K_{\text{оп}(1,2)}$ (%);
 - нелинейности АХ КП $\delta_{\text{а}(1,2)}$ (%);
 - неравномерности ЧХ КП $\gamma_{(1,2)}$ (%);
 - основные относительные погрешности $\delta_{(1,2)}$.
- Результаты приведены в таблице 2.

Зависимость КП ВП от частоты при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ приведены на рисунке 4.

На втором этапе первичной поверки, также используя систему ВС-321 и акселерометр 8305, были определены следующие дополнительные МХ ВП типа АП-11УС при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ:

- обратные КП $S_{(1,2)}$ (м·с⁻²/мВ);
 - неравномерности ЧХ обратного КП $\gamma_{\text{с}(1,2)}$ (%);
 - нелинейности АХ обратного КП $\delta_{\text{ас}(1,2)}$ (%);
 - коэффициенты взаимности $J_{(1,2)}$.
- Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 1

Перечень СИ (эталонов), участвующих в измерительном эксперименте.

№ п/п	Наименование и тип СИ (эталона), участвующих в измерительном эксперименте
1	Акселерометр пьезоэлектрический АП-11УС (опытный образец)
2	Рабочий эталон второго разряда – система измерительная виброакустическая ВС-321 (далее – система ВС-321)
3	Акселерометр 8305
4	Контроллер сбора данных многоканальный ZET^032
5	Генератор сигналов сложной формы со сверхнизким уровнем искажений DS360

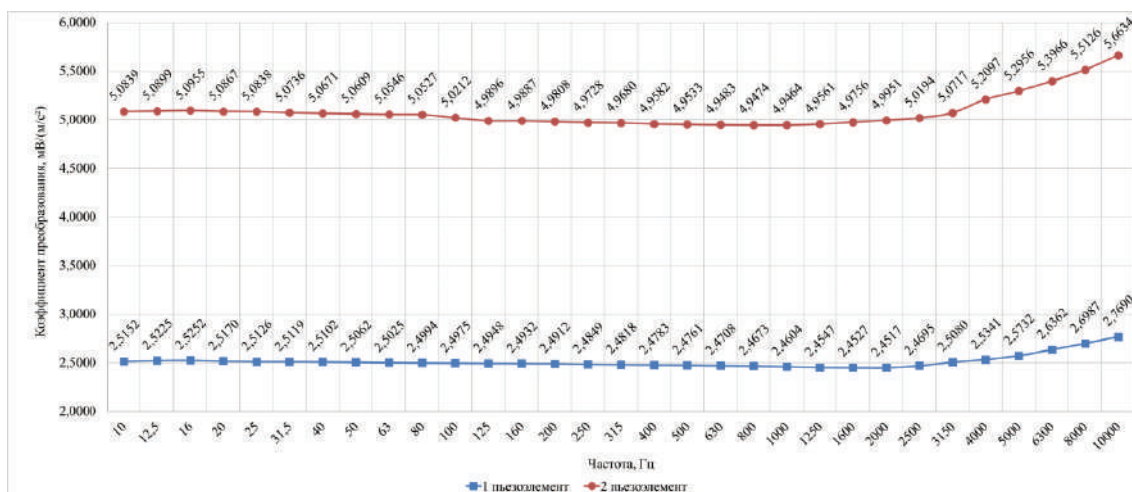


Рисунок 4 – Зависимость КП ВП от частоты при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ

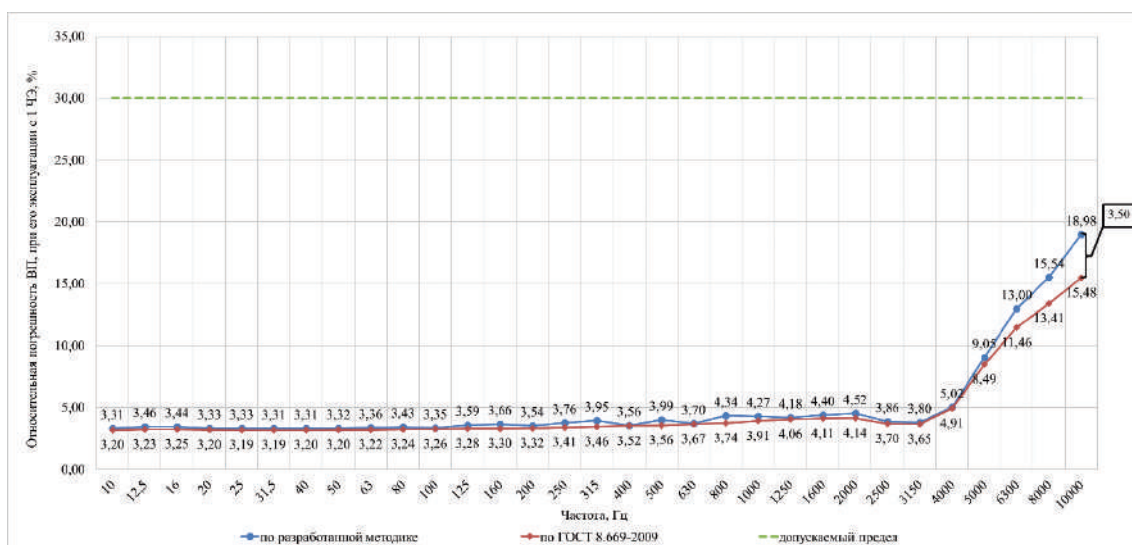


Рисунок 5 – Основные относительные погрешности ВП при его эксплуатации с первым ЧЭ

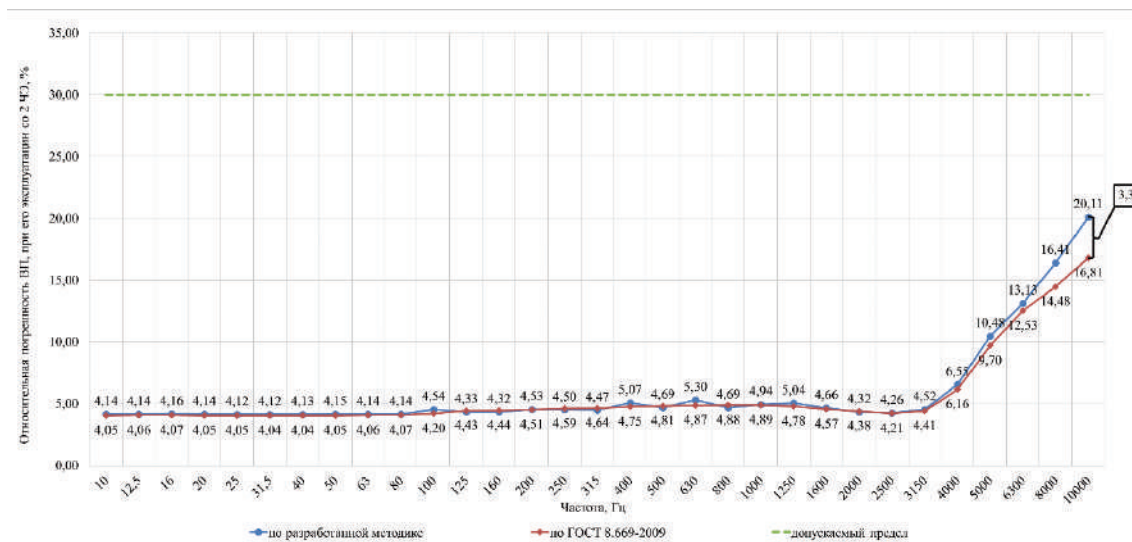


Рисунок 6 – Основные относительные погрешности ВП при его эксплуатации со вторым ЧЭ

Таблица 2

Результаты определения МХ на первом этапе первичной поверки.

МХ	Значение МХ ВП, при эксплуатации 1 ЧЭ	Значение МХ ВП, при эксплуатации 2 ЧЭ
$K_{Д(1,2)}$ (на базовой частоте)	2,5119	5,0736
$K_{ОП(1,2)}$	5	5
$\delta_{a(1,2)}$	1,53	2,72
$\gamma_{(1,2)}$	10,24	11,62
$\delta_{(1,2)}$	15,48	16,81

Таблица 3

Результаты определения МХ на втором этапе первичной поверки.

МХ	Значение МХ ВП, при эксплуатации 1 ЧЭ	Значение МХ ВП, при эксплуатации 2 ЧЭ
$S_{(1,2)}$ (на базовой частоте)	0,0019	0,0038
$\gamma_{s(1,2)}$	9,72	10,19
$\delta_{as(1,2)}$	1,01	1,05
$J_{(1,2)}$ (на базовой частоте)	1316,21	1321,49

На третьем этапе первичной поверки, используя контроллер сбора данных многоканальный ZET 032 и генератор DS360, были определены вспомогательные расчётные коэффициенты и МХ ВП типа АП-11УС при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ:

- коэффициент N_K ;
- коэффициенты $L_{(12)}$ и $L_{(21)}$;
- коэффициенты преобразований $K'_{(1,2)}$ (мВ/м·с⁻²);

- неравномерности ЧХ КП $\gamma'_{(1,2)}$ (%);
 - основные относительные погрешности $\delta'_{(1,2)}$.
- Результаты приведены в таблице 4.

Основные относительные погрешности ВП при его эксплуатации с первым и вторым ЧЭ, определенные по ГОСТ Р 8.669–2009 [14] и по разработанной методике определения МХ без демонтажа с объекта установки, представлены на рисунках 5 и 6.

Таблица 4

Результаты определения вспомогательных расчётных коэффициентов и МХ на третьем этапе первичной поверки.

МХ	Значение МХ ВП, при эксплуатации 1 ЧЭ	Значение МХ ВП, при эксплуатации 2 ЧЭ
N_K (на базовой частоте)	0,4953	
$L_{(12)}$ (на базовой частоте)	0,0096	
$L_{(21)}$ (на базовой частоте)	0,0097	
$K'_{(1,2)}$ (на базовой частоте)	2,5124	5,0727
$\gamma'_{(1,2)}$	9,99	11,87
$\delta'_{(1,2)}$	18,98	20,11

Как видно из рисунков 5 и 6, максимальная разность между значениями относительных погрешностей ВП, для первого ЧЭ, составило 3,5 %, для второго ЧЭ составило 3,3 %. Полученные отклонения, преимущественно, обусловлены увеличением неравномерностей ЧХ ВП с увеличением частоты рабочего диапазона. Вместе с тем, значения относительных погрешностей ВП не превышают допустимый предел – 30 % [1].

Таким образом, разработанная методика, в отличие от известных, позволяет определять МХ перспективных ВП с двумя ЧЭ без демонтажа с объекта установки и может быть использована для разработки методики поверки при проведении испытаний в целях утверждения типа новых образцов ВП с ВВД.

Литература:

1. БИГЮ.408119.040РЭ «Акселерометр пьезоэлектрический. Руководство по эксплуатации», 2018. – 22 с.
2. Ольховский В.В., Кувыкин Ю.А., Щедрин А.Ю. О реализации процедур метрологического самоконтроля пьезоэлектрических вибропреобразователей с внутренним возбуждением деформации чувствительных элементов на месте их установки // Вестник метролога. 2024. № 3. С. 22–32.
3. Селихов А.М. Двухканальный акселерометр / А.М. Селихов, А.В. Орлов, В.Я. Смирнов, Ю.А. Шоллин, А.Г. Штейн / Пат. RU 152648 Заявл. 28.01.2015/опубл. 10.06.2015. – Бюл. № 16.
4. Селихов А.М. Устройство для бездемонтажной проверки работоспособности виброметра с пьезоэлектрическим вибропреобразователем / А.М. Селихов, А.В. Орлов / Пат. RU 185575 Заявл. 22.05.2018/опубл. 11.12.2018. – Бюл. № 35.
5. Смирнов В.Я. Способ бездемонтажной поверки пьезоэлектрического вибропреобразователя на месте эксплуатации / В.Я. Смирнов, А.А. Козляковский, А.В. Орлов, Д.В. Скворцов / Пат. RU 2524743 Заявл. 06.11.2012/опубл. 20.05.2014. – Бюл. № 22.
6. Скворцов Д.В. Способ определения значения частоты установочного резонанса пьезоэлектрического вибропреобразователя и устройство для его осуществления / Д.В. Скворцов, А.В. Орлов, А.Л. Блохин / Пат. RU 2593646 Заявл. 22.05.2015/опубл. 10.08.2016. – Бюл. № 22.
7. Субботин М.И. Способ дистанционного периодического контроля коэффициента преобразования пьезоэлектрического акселерометра / М.И. Субботин / Пат. RU 2176396 Заявл. 05.10.2000/опубл. 27.11.2001.
8. Бараш В.Я. Пьезоэлектрический измерительный преобразователь вибрации с внутренним возбуждением деформации и способы его калибровки / В.Я. Бараш, М.Ю. Прилепко / Пат. RU 2643685 Заявл. 07.09.2016/опубл. 05.02.2018. – Бюл. № 4.
9. Иванов Ю.М. Способ поверки пьезоэлектрического вибропреобразователя без демонтажа с объекта контроля / Ю.М. Иванов, Б.В. Косенков / Пат. RU 2358244 Заявл. 26.09.2007/опубл. 06.10.2009. – Бюл. № 21.
10. Иванов Ю.М. Пьезоэлектрический вибропреобразователь / Ю.М. Иванов, Б.В. Косенков, В.А. Ураков / Пат. RU 133605 Заявл. 19.09.2012/опубл. 20.10.2013. – Бюл. № 29.
11. Зюзин В.Н. Бездемонтажный способ поверки виброакустических приемников / В.Н. Зюзин, Н.В. Краснописцев, В.Н. Некрасов, Б.П. Смирнов / Пат. RU 2538034 Заявл. 25.02.2013/опубл. 10.01.2015. – Бюл. № 1.
12. БИГЮ.468169.015–02МП «Информационно-измерительный комплекс «Автоном». Методика поверки», 2023. – 10 с.
13. ГИЕШ.411711.004 ДЗ «Аппаратура М052.971М. Методика поверки», 2014. – 13 с.
14. ГОСТ Р 8.669–2009 «ГСИ. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки».
15. ГОСТ ISO 16063–12–2013 «Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 12. Первичная вибрационная калибровка на основе принципа взаимности».
16. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрами предусилителям, 1978. – 111 с.
17. Кувыкин Ю.А., Соколов И.Н., Кулак В.А. Исследование метода определения частотной характеристики вибропреобразователей с применением широкополосной случайной вибрации // Вестник метролога. 2018. № 2. С. 8–12.

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКЕ THE SYSTEM OF ENSURING THE UNIFORMITY OF MEASUREMENTS IN THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

Шпилевский О.Б., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Руденкова Е. Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Shpilevskiy O.B., FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense
of the Russian Federation,
Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense
of the Russian Federation,
e-mail: shpilberg71@gmail.com, tel. +7(977)599-52-26;
e-mail: l654007@yandex.ru, tel. +7(985)923-70-72

Аннотация: представлены анализ и перспективы развития системы обеспечения единства измерений в Китайской Народной Республике.

Abstract: the analysis and prospects of the development of the measurements uniformity system in the People's Republic of China are presented.

Ключевые слова: единство измерений, метрология, регулирование, национальная система, поверка, калибровка, национальный институт метрологии, Китайская Народная Республика.

Keywords: uniformity of measurements, metrology, regulation, the national system, verification, calibration, National Institute of Metrology, People's Republic of China.

В последние годы экономика Китая демонстрирует активный рост. Производители КНР ориентированы на выпуск конкурентоспособной продукции, открывают миру новые бренды, используют современные технологии, иницируют проверку товаров третьими лицами, чтобы доказать высокую эффективность своих решений.

Это связано с развитием инфраструктуры качества, которую формируют многочисленные взаимосвязанные сферы деятельности, включая государственное регулирование качества продукции, развитие технических требований к ней, стандартизацию, оценку соответствия, аккредитацию, обеспечение единства измерений и анализ рынка.

Обеспечение единства измерений в Китае осуществляется через сочетание законодательных актов, структуры управления, деятельности национальных институтов и международного сотрудничества [1].

В Китае деятельность в области метрологии регулируется «Законом о метрологии Китайской Народной Республики», который был принят на заседании Постоянного комитета Всекитайского собрания народных представителей (ПК ВСНП) шестого созыва, опубликован в соответствии с Указом № 28 Председателя Китайской Народной Республики (КНР) (Ли Сяньняня) 6 сентября 1985 года и вступил в силу 1 июля 1986 года (изменения внесены в 2022 г.). Настоящий закон

призван повысить значение метрологического надзора и регулирования, осуществляемых в целях обеспечения единства национальной системы единиц измерений, повышения точности и достоверности значений величин, что способствует развитию экономики, торговли, науки и технологий в соответствии с задачами социальной модернизации, защиты интересов государства и трудящихся.

Государственная администрация по регулированию рынка Китая (далее SAMR) – административный орган в статусе министерства при Государственном совете (Госсовете) КНР, осуществляет надзор за деятельностью, связанной с законодательной метрологией на всей территории страны, и имеет следующий круг обязанностей:

- единообразное управление деятельностью, связанной с метрологией, поверкой и испытаниями;
- применение узаконенных единиц измерений и реализация национальной метрологической системы, управление СИ, прослеживаемость и передача, а также сличения;
- управление национальными эталонами, а также стандартными образцами;
- развитие национальной системы метрологического регулирования и ее реализация;
- надзор за измерением товаров потребления, весами и мерами на рынке, метрологическая поверка для арбитража, надзор за метрологиче-

скими институтами и специалистами в области метрологии;

- регулирование использования метрологических данных и т.п.

В его ведении находятся следующие вопросы:

- осуществление всестороннего надзора и управления рынком;

- осуществление единообразной регистрации рыночных экономических операторов и укрепление механизма прозрачности и обмена информацией для организованного обеспечения комплексного надзора за рынком и осуществления антимонопольного применения с целью нормализации и поддержания рыночного порядка;

- организация выполнения национальной стратегии качества, способствуя повышению качества продукции, продвигая безопасность импортируемых продуктов питания, а также контролируя безопасность специального оборудования;

- несение ответственности за создание национальных систем и инфраструктуры измерений, стандартов, испытаний, сертификации и аккредитации.

Кроме того, SAMR также поручено осуществлять надзор за вновь созданной Государственной администрацией по медикаментам и недавно реорганизованным Государственным бюро интеллектуальной собственности [2].

Национальный институт метрологии Китая (НИМ) основан в 1955 году и является некоммерческой, подведомственной SAMR организацией. Институт выполняет функции национального метрологического института Китая и центра законодательной метрологии государственного уровня (отвечает за эталоны, теоретическую метрологию и калибровочную службу). Институт является высшим звеном цепочки метрологической прослеживаемости Китая.

По состоянию на декабрь 2024 года штат института составлял около 1150 сотрудников. Он специализируется на исследованиях и разработках в традиционных областях и предоставлении услуг, а также является центром обслуживания клиентов НИМ. Институт концентрируется на передовых исследованиях, которые предъявляют высокие требования к лабораторным условиям.

Основные направления деятельности НИМ:

- проведение международных сличений эталонов и стандартных образцов для достижения эквивалентности;

- оценка эффективности методов измерений и точность их результатов;

- обеспечение распространения и прослеживаемости измерений;

- пересмотр национальных метрологических требований (спецификаций);

- формирование кадрового потенциала в области метрологии;

- международное сотрудничество в области метрологии и единства измерений.

НИМ активно участвует в деятельности международных и региональных метрологических организаций. Институт подписал соглашение о взаимном признании, а также двусторонние и многосторонние соглашения о научно-техническом сотрудничестве с национальными органами по метрологии России, США, Великобритании, Германии, Южной Кореи, Японии, Австралии и др [1].

Законодательные и технические требования к утверждению типа средства измерений заключаются в следующем:

- в любой деятельности по утверждению типа необходимо руководствоваться «Законом о метрологии КНР»;

- меры КНР по надзору за импортируемыми средствами измерений и управлению ими предусматривают требования по утверждению типа импортируемых средств измерений.

Органы, ответственные за испытания с целью утверждения типа (ИЦУТ) – метрологические институты, уполномоченные SAMR, обеспечивающие проведение ИЦУТ средств измерений. НИМ является одной из таких организаций.

Поверку средств измерений выполняют в соответствии с национальной системой поверок согласно положениям, регулирующим их проведение. В случае конкретных СИ, на которые не распространяются национальные положения по поверке, компетентные департаменты Госсовета КНР и административные метрологические департаменты народных правительств провинций, автономных районов и муниципалитетов, находящиеся в непосредственном ведении Центрального правительства, должны разрабаты-

вать ведомственные и административные положения о поверке.

Поверку СИ выполняют метрологические организации, назначенные или уполномоченные административными метрологическими департаментами местных правительств на уровне страны или на более высоком уровне. НИМ является национальным метрологическим институтом. На уровне провинций и городов центрального подчинения существуют метрологические организации административного уровня.

SAMR отвечает за единообразное управление деятельностью поверителей на всей территории Китая. К специалистам в области метрологии относятся сертифицированные поверители и метрологи. По состоянию на сентябрь 2024 г. в Китае насчитывается около 140 национальных первичных и более 400 рабочих эталонов.

SAMR также отвечает за разработку и реализацию системы регулирования сертификации и оценки соответствия, планирование и руководство развитием области сертификации, оказание помощи в борьбе с незаконной деятельностью в этой сфере, участие в международных или региональных организациях по сертификации и оценке соответствия продукции.

В Китае есть несколько компаний, которые занимаются калибровкой измерительного оборудования:

- «Tektronix» – компания представляет услуги по калибровке измерительного оборудования (расположена в г. Шэнчжэнь, провинция Гуандун);

- «Beijing Spake Technology» – производитель средств измерений, используемых для калибровки, включая цифровые манометры, калибраторы давления и температуры. (головной офис находится в г. Пекин, производственная база в г. Синсянь, провинция Хэнань);

- «Qualwave Inc.» – производитель и поставщик прецизионных калибровочных комплексов для обеспечения точности измерений в различных отраслях промышленности. (находится в г. Чэнду, провинция Сычуань).

Согласно перспективному плану, опубликованному Госсоветом КНР, Китай будет продвигать развитие в области метрологии. На первом

этапе КНР стремится к тому, чтобы к концу 2025 года сформировалась современная и передовая метрологическая система, а метрология играла более важную роль в различных экономических и социальных аспектах.

В плане изложены ключевые задачи в области метрологии, включая укрепление фундаментальных метрологических исследований и содействие применению метрологических технологий для обслуживания ключевых областей, таких, как передовое производство и искусственный интеллект.

Кроме того, план включает в себя развитие метрологии для редкоземельных магнитов – мощных материалов, изготовленных из элементов, которые в основном добываются и перерабатываются в Китае. Недавно Пекин добавил семь таких элементов в свой список экспортного контроля в ответ на новые тарифы США. Редкоземельные металлы важны для электромобилей, электроники и оборонной промышленности, поэтому такие страны, как США, сильно зависят от поставок из Китая.

Китай ожидает значительного прогресса в области метрологических технологий и инноваций к 2035 году, а также крупных прорывов в ключевых областях. В частности, планируется увеличить верхнее значение диапазона измерений частоты до 120 ГГц к 2027 году. В документе отмечается, что к этому времени в КНР будет создана национальная современная и передовая система с квантовой метрологией в основе [3].

Китай также будет наращивать метрологический потенциал для поддержки высококачественных разработок и усиления своего метрологического регулирования и мониторинга.

Литература:

1. Аронов И.З., Рыбакова А.М., Саламатов В.Ю. Обзор инфраструктуры качества КНР в современных условиях // Стандарты и качество. 2024 № 2, 2024. С. 82–86.
2. Закон о метрологии Китайской Народной Республики (с изменениями от 2022 года) <http://www.comet.org.ru.dejatelnost-zm-kitai>.
3. Законодательная метрология в Китае (с учетом пересмотренного закона «Правила в области метрологии Китайской Народной Республики») <http://www.comet.org.ru.countru.cn>.

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КУРСОВОГО УГЛА АСТРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

METHODOLOGY FOR ACCURACY CHECKING OF HEADING ANGLE DETERMINING OF A STELLAR INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

Болотнов А.С., аспирант кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана
(Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1),

Кондрашкин Г.В., аспирант кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ
им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Bolotnov A.S., Post-Graduate Student, Department of Instrument Production Techniques, BMSTU
(2-ya Baumanskaya ul. 5, str.1, Moscow, 105005 Russian Federation),

Kondrashkin G.V., Post-Graduate Student, Department of Instruments and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation,
BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str.1, Moscow, 105005 Russian Federation),
bolotnovvalbert@mail.ru, 8(968)958-19-56
yaegor93@mail.ru, 8(916)715-12-98

Аннотация: рассмотрена методика проверки точности определения курсового угла астроинерциальной навигационной системы. Определены требования по формированию и обеспечению рабочего места проведения измерений. Даны теоретические основы метода измерений. Показаны результаты измерений курсового угла на каждом румбе. Проведен анализ результатов измерений. Сделан вывод о применимости настоящей методики в части метрологического обеспечения технологии разработки и производства астроинерциальных навигационных систем.

Abstract: the article discusses a methodology for verifying the accuracy of determining the heading angle of an stellarinertial navigation system. The requirements for the formation and maintenance of a workplace for conducting measurements are defined. The theoretical foundations of the measurement method are presented. The results of measuring the heading angle for each compass point are shown. An analysis of the measurement results is carried out. A conclusion is made regarding the applicability of this methodology in terms of metrological support for the development and production technology of stellarinertial navigation systems.

Ключевые слова: астроинерциальная навигационная система, методика проверки, измерительный стенд, курсовой угол, геодезические измерения, поправка.

Keywords: stellar inertial navigation system, verification methodology, test bench, heading angle, geodetic measurements, correction.

Исторически, астрономические системы долгое время являлись основным навигационным средством мореплавателей и путешественников. Задача навигации решалась путем измерения углового положения светила относительно плоскости искусственного горизонта, которая задает положение астрономической вертикали. В настоящее время в системах астронавигации в качестве ее построителя, в основном, используют инерциальные измерительные блоки. Такие системы называются астроинерциальными (АНС).

Традиционно, принцип работы таких систем заключался в наведении оси оптического прибора на отдельные светила и последующем измерении их угловых положений в местной географической системе координат. Однако, с появлением цифровых оптических астродатчиков, включающих в себя широкопольный объектив и приемную матрицу, появилась возможность использования астрономо-геодезического принципа определения координат наблюдателя и истинного направления [1,2].

Указанный принцип основан на измерении углового положения оптической оси астродатчика во второй экваториальной системе координат по совокупности наблюдаемых астроориентиров. Ее координаты измеряются в инерциальной системе координат, после чего через углы инерциальной вертикали пересчитываются в местную географическую систему координат. Астроинерциальные системы нового поколения, построенные на описанном принципе, были названы системами проекционного типа. В данной работе рассматривается методика проверки точности определения курсового угла такой астросистемы.

Рассматриваемая проверка проводилась в полевых условиях на специализированном рабочем месте. Общие требования к их формированию и обеспечению:

1. Благоприятные климатические условия:
 - число ясных дней в году;
 - высота над уровнем моря не менее 0,8...1 км.

Качество изображения определяется толщиной слоя атмосферы.

2. Стабильность движения воздушных масс:
– отсутствие тепловых потоков от зданий, сооружений и других источников тепла;
– отсутствие или незначительное движение воздуха вследствие ветра.

3. Отсутствие засветки от уличного освещения и ближайших населенных пунктов.

4. Отсутствие выбросов от ближайших промышленных предприятий и объектов городского хозяйства.

5. Открытое место расположения точки наблюдения.

6. Удобство эксплуатации и обслуживания:

- наличие источников энергоснабжения;
- наличие качественного канала связи;
- обеспечение сохранности оборудования.

Всем этим требованиям соответствуют места расположения астрономических обсерваторий, например, Крымская астрофизическая обсерватория РАН (44°44" с.ш., 34°02" в.д.). Все измерения, описанные в настоящей методике, проводились на площадке этой обсерватории.

На рисунке 1 приведена схема стенда для проведения измерений.

На рисунке 1 приведены следующие обозначения:

M1 и M2 – геодезические метки. Каждая из них выполнена в виде вертикальной риски, нанесенной на металлическую пластину, которая крепится на стене удаленного сооружения. Геодезические метки образуют базовую ориентирную линию относительно Северного направления, определенную с погрешностью 10 угл.сек. Углы α_1 – азимут направления «M1-M2», α_2 – азимут направления «M2-M1». Обе метки расположены в зоне видимости друг относительно друга и образуют базовое направление стенда.

Стрелка «S-N» обозначает направление на Север.

P1 – реперная точка положения базового теодолита с погрешностью измерения угловых параметров не более 5 угл. сек. Установлен между геодезическими метками M1 и M2 так, чтобы показание угла визирования на шкале прибора при развороте зрительной трубы с одной метки на другую составляло 180,0°. Положение базового теодолита остается неизменным в течение всего хода измерений.

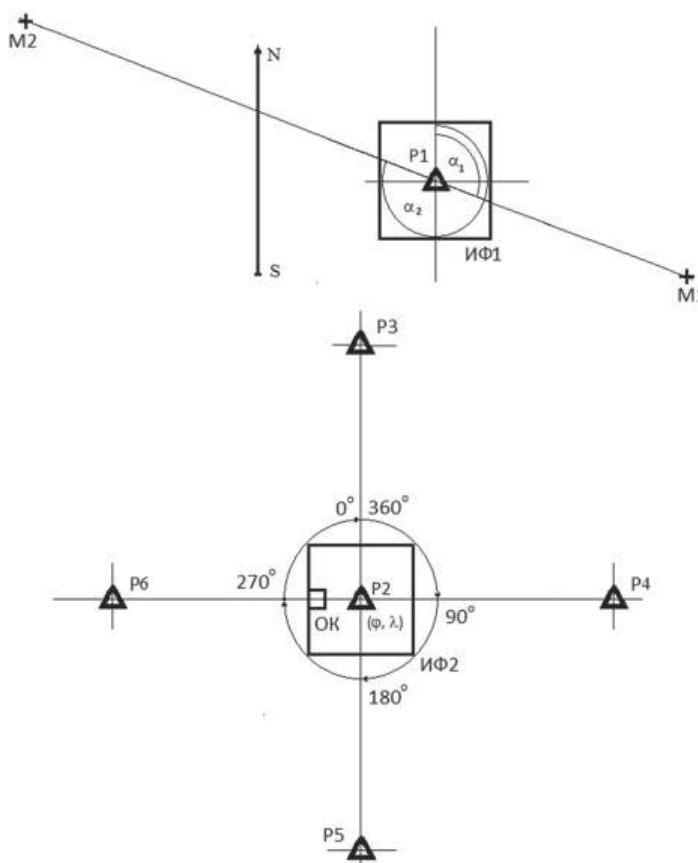


Рисунок 1 – Схема стенда для проведения измерений

ИФ1 – изолирующий от внешних вибраций фундамент для базового теодолита. Изолирующий от внешних вибраций фундамент [3]. должен обеспечивать:

- прочность, устойчивость и стойкость при проведении работы с образцом АНС;
- исключение недопустимых осадок и деформаций, нарушающих работу образца;
- исключение недопустимых вибраций, мешающих работе образца.

Курсовой угол определяется в четырех положениях на румбах 0° , 90° , 180° , 270° двумя способами – в астроинерциально-спутниковом режиме и геодезическим способом. Вследствие того, что ошибка измерения курсового угла геодезическим способом значительно меньше ошибки измерения в астроинерциально-спутниковом режиме, измерение геодезическим способом можно считать эталонным.

Оценку ошибки этого измерения можно провести следующим способом. Имеется ориентирное направление, определенное с точностью 5 угл.сек. и два угла, измеренные теодолитами с точностью 5 угл. сек. Таким образом, общая погрешность измерения составляет $5 \cdot \sqrt{3} \approx 9$ угл.сек. Такая ошибка измерения характерна для всех направлений измерения курсового угла.

Для каждого из румбов курсовой угол, измеренный астроинерциально-спутниковым методом определяется согласно выражению:

$$\psi = \arctg \left[\frac{-M_{\text{МСК}}^{\text{АПСК}}_{13}}{M_{\text{МСК}}^{\text{АПСК}}_{33}} \right],$$

где $M_{\text{МСК}}^{\text{АПСК}} = M_{\text{АПСК}}^{\text{ЗПСК}}{}^{-1} \cdot M_{\text{ИСК}}^{\text{ЗПСК}}{}^{-1} \cdot M_{\text{ИСК}}^{\text{ГСК}}{}^{-1} \cdot M_{\text{ГСК}}^{\text{МСК}}{}^{-1}$;

$M_{\text{ИСК}}^{\text{ГСК}}$ – угловая ориентация системы координат геоцентрической системы координат относительно инерциальной (второй экваториальной) системы координат в виде матрицы направляющих косинусов (МНК);

$M_{\text{ГСК}}^{\text{МСК}}$ – угловая ориентация системы координат местной географической системы координат относительно геоцентрической (гринвичской) системы координат в виде МНК;

$M_{\text{МСК}}^{\text{АПСК}}$ – угловая ориентация системы координат астросистемы, задаваемой системой координат инерциального блока (ИИБ), относительно местной системы координат в виде МНК;

$M_{\text{АПСК}}^{\text{ЗПСК}}$ – угловая ориентация системы координат астродатчика относительно системы координат астросистемы в виде МНК, в идеальном случае $M_{\text{АПСК}}^{\text{ЗПСК}} = E$;

$M_{\text{ИСК}}^{\text{ЗПСК}}$ – угловая ориентация системы координат астродатчика относительно инерциальной системы координат в виде МНК.

Далее курсовой угол определяется геодезическим способом.

1. Для румба 0° опорно-поворотного устройства (рисунок 2).

С помощью измерительного теодолита с погрешностью измерения 5 угл.сек. можно опреде-

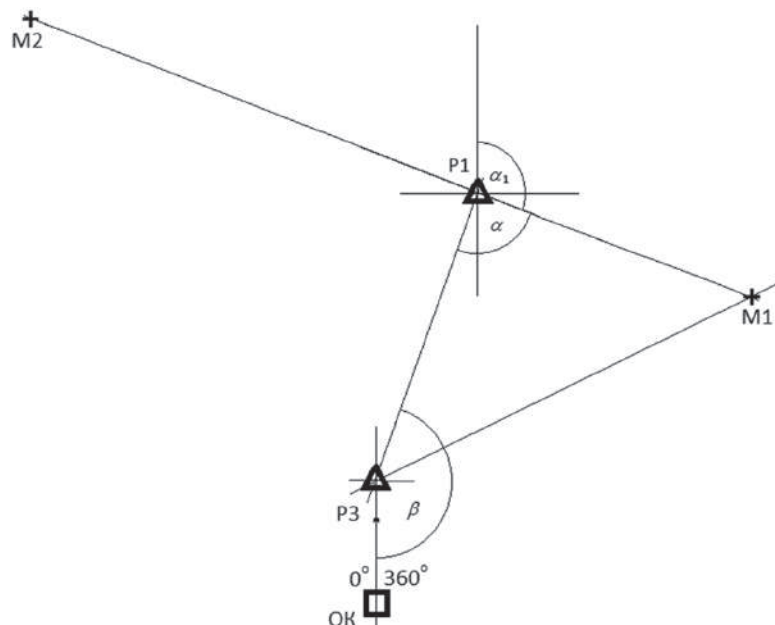


Рисунок 2 – Определение курсового угла геодезическим способом для ориентации АНС на румбе 0°

лечь направление его зрительной трубы β относительного эталонного азимутального направления α базового теодолита. Исходя из геометрических соображений согласно рисунку 3.6 искомый курсовой угол A_0 будет найден по формуле:

$$A_0 = \alpha_1 + \alpha + \beta.$$

Результаты пятикратно повторенных геодезических измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Измерение курсового угла при ориентации АНС на румбе 0°.

Параметр	1	2	3	4	5
α , град.	83,31	83,32	83,34	83,32	83,31
β , град.	165,05	165,06	165,03	165,03	165,04
A_0 , град.	359,91	359,93	359,92	359,90	359,9
δA_0 , град.	0,06	0,08	0,07	0,05	0,05

Здесь для всех измерений α_1 111,55°.

δA_{0i} – отклонение измеренного курсового угла от курсового угла, измеренного астроинерциально-спутниковым способом. Для ориентации астросистемы 0°, его осредненное за 20 минут реализации значение $A_{0A} = 359,85^\circ$, СКО измерений $\sigma_{0A} 0,009^\circ \approx 32$ угл.сек.

$\delta \bar{A}_0 = 0,062$ град. = 3,7 угл.мин., $\delta \bar{A}_0$ – осредненное отклонение курсового угла при ориентации АНС на румбе 0°.

2. Для румба 90°

С помощью исполнительного механизма поворотного устройства задается ориентация АНС по курсовому углу 90°. Курсовой угол измеряется астроинерциально-спутниковым и геодезическим способом. Процесс измерений повторяется аналогично предыдущему случаю.

Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2

Измерение курсового угла при ориентации АНС на румбе 90°.

Параметр	1	2	3	4	5
α , град.	40,14	40,13	40,14	40,12	40,13
β , град.	61,93	61,93	61,92	61,94	61,93
A_{90} , град.	89,76	89,75	89,77	89,73	89,75
δA_{90} , град.	0,09	0,08	0,1	0,06	0,08

δA_{90i} – отклонение измеренного курсового угла от курсового угла, измеренного астроинерциальным способом. Для ориентации АНС 90° его осредненное за 20 минут реализации значение $A_{0A} = 89,67^\circ$, СКО измерений $\sigma_{90A} = 0,01^\circ = 36$ угл.сек.

$\delta \bar{A}_{90} = 0,084$ град. ≈ 5 угл.мин., $\delta \bar{A}_{90}$ – осредненное отклонение курсового угла при ориентации АНС на румбе 90°.

3. Для румба 180°

С помощью исполнительного механизма поворотного устройства задается ориентация АНС по курсовому углу 180°. Курсовой угол измеряется астроинерциально-спутниковым и геодезическим способом. Процесс измерений повторяется аналогично предыдущему случаю.

Результаты измерений приведены в таблице 3.

Таблица 3

Измерение курсового угла при ориентации АНС на румбе 180°.

Параметр	1	2	3	4	5
α , град.	111,55	111,55	111,55	111,55	111,55
β , град.	76,54	76,55	76,52	76,55	76,53
A_{180} , град.	7,85	7,88	7,86	7,87	7,86
δA_{180} , град.	180,24	180,22	180,21	180,23	180,22

δA_{180i} – отклонение измеренного курсового угла от курсового угла, измеренного астроинерциальным способом. Для ориентации АНС 180° его осредненное за 20 минут реализации значение $A_{180A} = 180,12^\circ$, СКО измерений $\sigma_{180A} 0,12^\circ = 43$ угл.сек.

$\delta \bar{A}_{180} = 0,104$ град. = 6,2 угл.мин., $\delta \bar{A}_{180}$ – осредненное отклонение курсового угла при ориентации АНС на румбе 180°.

4. Для румба 270°

С помощью исполнительного механизма поворотного устройства задается ориентация АНС по курсовому углу 270°. Курсовой угол измеряется астроинерциально-спутниковым и геодезическим способом. Процесс измерений повторяется аналогично предыдущему случаю.

Результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4

Измерение курсового угла при ориентации АНС на румбе 270°.

Параметр	1	2	3	4	5
α , град.	104,42	104,45	104,43	104,42	104,43
β , град.	54,13	54,13	54,14	54,15	54,12
A_{270} , град.	270,1	270,13	270,12	270,12	270,1
δA_{270} , град.	0,08	0,11	0,1	0,1	0,08

δA_{270i} – отклонение измеренного курсового угла от курсового угла, измеренного астроинерциальным способом. Для ориентации АНС 270° его осредненное за 20 минут реализации значение $A_{270A} = 270,02^\circ$, СКО измерений $\sigma_{270A} = 0,009 \approx 32$ угл.сек.

$\delta \bar{A}_{270} = 0,094$ град. $\approx 5,6$ угл.мин., $\delta \bar{A}_{270}$ – осредненное отклонение курсового угла при ориентации АНС на румбе 270°.

Далее рассматриваются осредненные отклонения курсового угла $\delta \bar{A}_N$ для всех румбов. Каждое из них содержит постоянную составляющую, которая остается неизменной в течение всей серии измерений, сохраняя величину и знак [4]. Эта постоянная (систематическая) составляющая свидетельствует о рассогласовании приборных систем координат ИИБ и астродатчика [5], связь которых определяется МНК $M_{АПСК}^{ЗПСК}$. Указанная систематическая погрешность должна быть исключена из результатов измерений с помощью введения поправки (таблица 5). Данная постоянная составляющая определяется в виде среднего значения отклонений на всех румбах.

Таблица 5

Введение поправки в измерения курсового угла

Румб	Отклонение, град.	Поправка, град.	Коррекция, град.	Коррекция, мин.
0°	0,062	0,086	-0,024	-1,44
90°	0,084	0,086	-0,002	-0,12
180°	0,104	0,086	0,018	1,08
270°	0,094	0,086	0,008	0,48

Найденная указанным методом поправка будет введена в программно-математическое обеспечение АНС и учтена при дальнейших вычислениях.

Анализируя таблицу 5, следует отметить, что после введения поправки погрешность определения курсового угла не выходит за пределы 2 угловых минут, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным астросистемам. Предложенную методику следует рассматривать как важную составляющую метрологического обеспечения технологий разработки и производства астронавигационных систем.

Литература

1. Основы определения корректирующих поправок в бесплатформенной астроинерциальной навигационной системе / Ю.Н. Герасимчук, С.Г. Брайткрайц, С.А. Болотнов, М.Б. Людомирский, И.С. Каютин, Н.Е. Ямщиков, Р.В. Бессонов // Новости навигации, № 4, 2011. С. 33 – 39.

2. Болотнов А.С., Кондрашкин Г.В. Эволюция технических решений в построении систем астроинерциальной навигации. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2024, № 4 (149), с. 4–24.

2. Бесплатформенная астроинерциальная навигационная система авиационного применения / Г. А. Аванесов, Р. В. Бессонов, В. А. Ваваев, Е.А. Мыслик [и др.] // Механика, управление и информатика. – 2011. – № 2. – С. 13–35.

3. Патент РФ 94 005 055 А1. Виброизолирующий фундамент для испытаний приборов / Евсеева Н.Д., Шлынов О.В. Заявл. 02.11.1994. Опубл. 27.09.1995.

4. Неверов А. Н. Основы теории погрешностей: учебно-методическое пособие / А. Н. Неверов; – М.: Изд-во МАДИ, 2021. – 59 с.

5. Болотнов А.С., Бурый Е.В., Кондрашкин Г.В. Достижимые погрешности определения навигационных параметров, формируемых астроинерциальной навигационной системой. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2025, № 2 (151), С. 4–18.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСШИРЕННОГО ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ ЧЕРЕЗ НЕПРЕРЫВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ
THEORETICAL FOUNDATIONS FOR DETERMINING THE EXTENDED VECTOR OF THE CONSUMER'S STATE OF MOTION THROUGH CONTINUOUS MEASUREMENT OF THE ORTHOGONAL COMPONENTS OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD

Фокин А.П., к.т.н., ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
 Фокина Н.Н., ФГБУ «ГНМЦ» Министерства обороны Российской Федерации
 Fokin A.P., Military and Air academy of Zhukovsky and Gagarin (VUNTs Air Force «VVA»)
 fox_314@mail.ru, tel. 8(905)569-54-17

Fokina N.N., Senior Research Officer, Federal State Budgetary Institution «Main Scientific Metrological Center»
 of the Ministry of Defense of the Russian Federation

Аннотация: рассмотрена теоретическая возможность навигации по магнитному полю Земли, основанная на решении классической физической задачи по определению скорости летательного аппарата через непрерывные измерения магнитной индукции и электродвижущей силы, возникающей на концах крыльев летательного аппарата. Представлен анализ существующих исследований навигации по градиенту магнитного поля Земли на основе корреляционно-экстремальных систем с использованием магнитных карт, выделены их недостатки. Построена модель погрешности и приведена оценка погрешности определения ортогональных составляющих вектора скорости предложенным методом.

Abstract: the theoretical possibility of navigating through the Earth's magnetic field is considered, based on solving the classical physical problem of determining the speed of an aircraft through continuous measurements of magnetic induction and electromotive force arising at the ends of the wings of an aircraft. An analysis of existing studies of navigation along the gradient of the Earth's magnetic field based on correlation-extreme systems using magnetic maps is presented, and their disadvantages are highlighted. An error model is constructed and an estimate of the error in determining the orthogonal components of the velocity vector by the proposed method is given.

Ключевые слова: навигация, магнитное поле Земли, магнитная индукция, вектор скорости, вектор магнитной индукции.

Keywords: navigation, Earth's magnetic field, magnetic induction, velocity vector, magnetic induction vector.

Введение.

В настоящее время глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) получили широкое распространение и применяются в различных сферах. При этом многие системы, в том числе критические, имеют сильную зависимость от ГНСС. Сигналы ГНСС используют в своей работе различные средства навигации, которые не только позволяют определять свое местоположение и параметры движения, но и обеспечивают безопасность полетов летательных аппаратов и судоходства.

Из-за участившихся случаев санкционированного и несанкционированного применения средств подавления сигналов глобальных спутниковых систем, все чаще встает вопрос об альтернативных методах навигации.

Низкий уровень сигналов ГНСС (10^{-16} Вт или минус 160 дБВт) делает возможным подавление в большом радиусе даже маломощными помеховыми излучателями. Устройства подавления ГНСС находятся в свободной продаже, имеют низкую

стоимость. Схемы подобных устройств подавления находятся в открытом доступе сети «Интернет».

Цель исследования.

Сложившиеся обстоятельства требуют поиска альтернативных методов навигации и точного геопозиционирования. Одним из возможных методов рассматривается метод определения координат по магнитному полю Земли [1].

Из курса физики известна классическая задача по определению скорости летательного аппарата через непрерывные измерения магнитной индукции магнитного поля Земли и электродвижущей силы, возникающей на концах крыльев летательного аппарата.

При известных начальных координатах летательного аппарата, непрерывное определение ортогональных составляющих вектора скорости позволяет определить расширенный вектор состояния движения потребителя. То есть, измеряя скорость можно рассчитывать приращение координат при движении объекта.

Для всестороннего рассмотрения предложенного метода необходимо оценить теоретическую точность определения ортогональных составляющих скорости летательного аппарата на основе непрерывного измерения индукции магнитного поля Земли и электродвижущей силы.

Методы. Магнитное поле Земли.

В первом приближении магнитное поле Земли подобно полю гигантского магнитного диполя, расположенного в центральных частях земного шара, с Южным магнитным полюсом, расположенным в северном полушарии, и с Северным магнитным полюсом – в южном полушарии.

Проводимые измерения параметров магнитного поля Земли за длительный период наблюдений в околоземном пространстве и их статистическая обработка определяют статистические характеристики поля. Эти характеристики позволяют построить геомагнитную модель, характеризующую собой пространственно-временное распределение параметров магнитного поля Земли, необходимое для решения задач навигации и ориентации.

Функционирование систем ориентации и навигации, основанных на использовании магнитного поля Земли, существенно осложняет высокий уровень помех от источников магнитного поля на движущийся объект и случайных флуктуаций и магнитных бурь, присущих магнитному полю Земли. В связи с этим возникают проблемы измерения и компенсации внешних магнитных возмущений и статистической фильтрации случайных помех.

В общем случае магнитное поле Земли представляет собой сложную векторную функцию координат местонахождения и времени. Путем многолетних наблюдений установлено, что вектор $\vec{H}$ напряженности магнитного поля Земли представляет собой сумму векторов отдельных полей:

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_M + \vec{H}_a + \delta\vec{H}_b,$$

которые обусловлены:

$\vec{H}_0$ – магнитным полем однородного намагничивания тела Земли, называемым дипольным, этот вектор наибольший по величине; $\vec{H}_M$ – магнитным полем неоднородных внутренних слоев Земли, называемым материковым полем (полем материковых аномалий); $\vec{H}_a$ – магнитным полем

от намагничивания пород земной коры, называемым аномальным полем; $\delta\vec{H}_b$ – внешним по отношению к Земле источником поля, называемого полем геомагнитных вариаций. [2]

Сумму векторов

$$\vec{H}_H = \vec{H}_0 + \vec{H}_M$$

называют обычно вектором напряженности нормального геомагнитного поля

При более полном рассмотрении хорошо заметны отклонения от дипольного поля. Они возникают в основном за счет мировых (материковых) аномалий магнитного поля ($\vec{H}_a$, $\delta\vec{H}_b$). Наиболее сильными среди последних являются Восточно-Сибирская аномалия, повышающая напряженность магнитного поля, и Южно-Атлантическая или Бразильская аномалия с резко пониженным значением поля. Также присутствуют медленные и быстрые (магнитные бури) вариации магнитного поля Земли, вызванные различными процессами, происходящими как в недрах планеты, так и в Солнечной системе.

Нормальное геомагнитное поле в первом приближении может быть представлено полем диполя по той причине, что напряженность поля диполя $\vec{H}_0$ на всей земной поверхности существенно больше напряженности $\vec{H}_M$ поля материковых аномалий. Дипольное поле, как считают, в основном порождается мощными токовыми системами в проводящем ядре Земли. [2]

В любой точке земной поверхности вектор напряженности магнитного поля Земли $\vec{H}$ направлен по касательной к силовым линиям. Магнитное поле на экваторе направлено горизонтально, у магнитных полюсов направлено вертикально, а в остальных точках земной поверхности направлено под некоторым углом (рисунок 1). При этом полная напряженность магнитного поля Земли изменяется от 33,4 А/м в приэкваториальных областях до 55,7 А/м на полюсах. Горизонтальная составляющая изменяется от 33,4 А/м в приэкваториальных областях до 0 в магнитных полюсах. Для Хабаровска НГ $\approx 15,9$ А/м. [3]

На рисунке 1 указано: а – силовые линии; б – вектор напряженности магнитного поля ($\vec{H}$); H_z – горизонтальная составляющая вектора напряженности магнитного поля; H_g – вертикальная составляющая вектора напряженности магнитного поля; α – магнитное склонение.

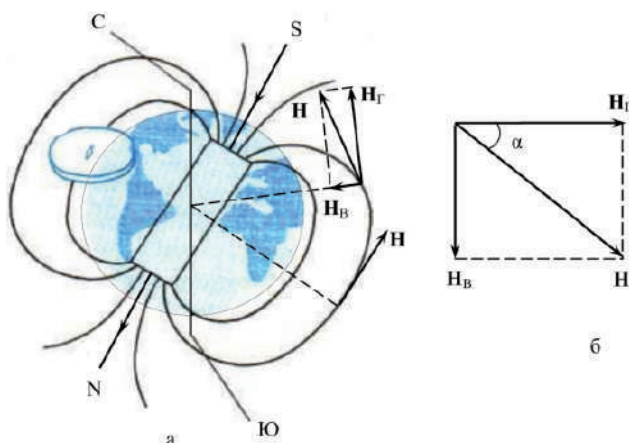


Рисунок 1 – Магнитное поле Земли

В Российской Федерации уже есть попытки по созданию навигационного устройства, использующего в качестве первичной измерительной информации измерения вектора магнитной индукции магнитного поля Земли. Но данные работы основаны на применении «магнитных» карт, составленных по результатам многолетних наблюдений на различных полигонах, что делает их ограничено пригодными. Существующие карты магнитных градиентов охватывают не всю площадь и высоту, а их ошибки достигают 385 нТл. При этом в данных работах, рассматривается навигация по аномалиям (возмущениям) магнитного поля Земли, так как в основном магнитное поле равномерно и уровень аномалий с высотой уменьшается, а погрешность их привязки составляет 200 – 500 м. Во время магнитных бурь геомагнитные возмущения могут достигать 1000 нТс с периодом от 2 до 10 минут в течение нескольких часов, что делает невозможным использование заранее составленных магнитных карт. При этом присутствуют утренние, ночные и суточные пульсации магнитного поля Земли величиной до 150 нТл. [4–7]

Методы. Решение навигационной задачи.

Для решения классической навигационной задачи необходимо определить расширенный вектор состояния движения потребителя: $\vec{P} = |x_0, y_0, z_0, V_x, V_y, V_z, t|$, где x_0, y_0, z_0 – начальные координаты потребителя, V_x, V_y, V_z – составляющие вектора скорости потребителя (направление и скорость движения), t – текущее время. Начальные координаты потребителя легко определить, если точка начала движения известна, например, система гео-

дезических реперов на аэродроме. Текущее время, с момента начала движения, определяется по стандарту частоты, находящемуся на борту потребителя. В зависимости от необходимой точности это может быть квантовая или кварцевая мера частоты и времени. Остается определить составляющие вектора скорости потребителя V_x, V_y, V_z .

Для определения составляющих вектора скорости потребителя предлагается решить классическую задачу по физики, когда известна величина и направление вектора магнитной индукции относительно направления движения самолета, электродвижущая сила, возникающая на концах его крыльев, и необходимо найти скорость (рисунок 2). Решается данная задача по формуле 1. [8]

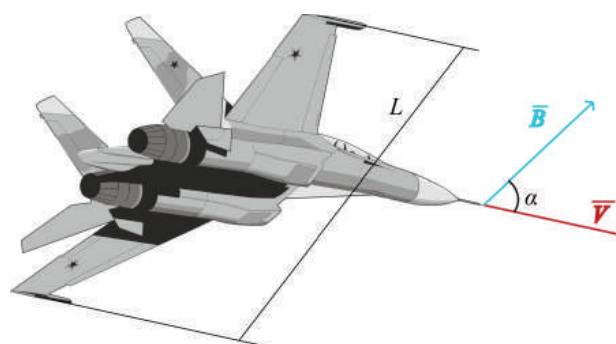


Рисунок 2 – Движение самолета в магнитном поле Земли.

$$|\vec{v}| = \frac{\varepsilon}{|\vec{B}| \times l \times \sin \alpha}, \quad (1)$$

где: ε – электродвижущая сила, возникающая на концах крыльев самолета (проводника, движущегося в магнитном поле); B – величина магнитной индукции; l – размах крыльев (длина проводника); α – угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением движения самолета.

Для решения задачи навигации, поиска составляющих вектора скорости потребителя, необходимо измерить электродвижущую силу на концах крыльев самолета и составляющие вектора магнитной индукции по трем осям.

Для измерения составляющих вектора магнитной индукции (проекций по осям координат) можно использовать изготавливаемые промышленностью трех осевые магнитометры, измеряющие ортогональные составляющие вектора магнитной индукции, совместив датчики с направлением осей координат.

Определим $\sin \alpha$ между вектором магнитной индукции и осью абсцисс (рисунок 3).

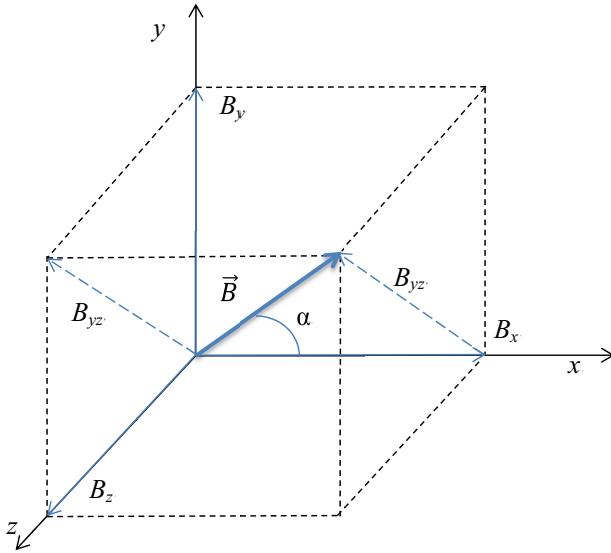


Рисунок 3 – Составляющие вектора магнитной индукции по осям декартовой системы координат.

Для определения $\sin \alpha$ и скалярной величины вектора магнитной индукции $|\vec{B}|$ построим прямоугольные треугольники, в которых вектор магнитной индукции будет гипотенузой, а его проекции на оси и плоскости – катетами:

$$|B_{yz}| = \sqrt{B_y^2 + B_z^2}; \quad (2)$$

$$|B| = \sqrt{B_{yz}^2 + B_x^2}, \quad (3)$$

где B_{yz} – проекция вектора магнитной индукции на плоскость YZ ; B_x, B_y, B_z – проекции вектора магнитной индукции на оси декартовой системы координат, соответственно.

Таким образом, $\sin \alpha$ будет равен:

$$\sin \alpha = \frac{B_{yz}}{\sqrt{B_{yz}^2 + B_x^2}}, \text{ или} \quad (4)$$

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{B_y^2 + B_z^2}}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}}. \quad (5)$$

Применяя формулы 2–5 и проекции вектора магнитной индукции на остальные декартовы плоскости, можно рассчитать синусы углов между другими осями координат и вектором магнитной индукции.

Измерив электродвижущую силу на концах крыльев и зная их размах, можно рассчитать составляющую скорости самолета по оси абсцисс:

$$V_x = \varepsilon / \left(B_x \times l \times \sqrt{\frac{B_y^2 + B_z^2}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}} \right). \quad (6)$$

Таким же образом можно рассчитать составляющие скорости по осям ординат и аппликат:

$$V_y = \varepsilon / \left(B_y \times l \times \sqrt{\frac{B_x^2 + B_z^2}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}} \right), \quad (7)$$

$$V_z = \varepsilon / \left(B_z \times l \times \sqrt{\frac{B_x^2 + B_y^2}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}} \right). \quad (8)$$

По формулам 6–7, через измерения ортогональных составляющих вектора магнитной индукции можно определить недостающие составляющие вектора скорости потребителя для построения вектора состояния движения потребителя ($\vec{\Pi} = |x_0, y_0, z_0, V_x, V_y, V_z, t|$).

Оценим погрешность определения составляющих вектора скорости. Для начала нужно определить, какие факторы будут влиять на ее погрешность.

Построим модель погрешности определения составляющей вектора скорости по направлению оси абсцисс:

$$\Delta V_x = \sqrt{\Delta \varepsilon^2 + \Delta l^2 + \Delta B_x^2 + \Delta B_y^2 + \Delta B_z^2},$$

где: $\Delta \varepsilon$ – погрешность измерения электродвижущей силы; Δl – погрешность измерения размаха крыльев (длины проводника) самолета; $\Delta B_x, \Delta B_y, \Delta B_z$ – погрешности измерения составляющих вектора магнитной индукции по осям координат x, y, z , соответственно.

Для расчета погрешности определения составляющей вектора скорости необходимо продифференцировать выражение (6) и найти частные производные $\frac{dV}{d\varepsilon}, \frac{dV}{dl}, \frac{dV}{dB_x}, \frac{dV}{dB_y}, \frac{dV}{dB_z}$.

$$\frac{dV}{d\varepsilon} = \frac{1}{B_x \times l \times \sqrt{\frac{B_y^2 + B_z^2}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}}}, \quad (9)$$

$$\frac{dV}{dl} = -\frac{\varepsilon}{B_x \times l^2 \times \sqrt{\frac{B_y^2 + B_z^2}{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}}}, \quad (10)$$

$$\frac{dV}{dB_x} = -\frac{\varepsilon}{l} \times \frac{\sqrt{B_y^2 + B_z^2}}{B_x^2 \times \sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}}, \quad (11)$$

$$\frac{dV}{dB_y} = -\frac{\varepsilon}{l} \times \frac{\sqrt{B_x^2 + B_z^2}}{B_y^2 \times \sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}}, \quad (12)$$

$$\frac{dV}{dB_z} = -\frac{\varepsilon}{l} \times \frac{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}}{B_z^2 \times \sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}}. \quad (13)$$

$$\sigma V_x = \sqrt{\left(\frac{dV}{d\varepsilon}\right)^2 \times \sigma_\varepsilon^2 + \left(\frac{dV}{dl}\right)^2 \times \sigma_l^2 + \left(\frac{dV}{dB_x}\right)^2 \times \sigma_{B_x}^2 + \left(\frac{dV}{dB_y}\right)^2 \times \sigma_{B_y}^2 + \left(\frac{dV}{dB_z}\right)^2 \times \sigma_{B_z}^2} \quad (14)$$

Модель погрешности определения составляющей вектора скорости по направлению остальных осей находится аналогичным путем.

Учитывая, что погрешность измерения и максимально измеряемые величины ортого-

нальных составляющих вектора магнитной индукции по всем осям равна, так как используются идентичные преобразователи, тогда можно записать:

$$\sigma V_x = \sigma V_y = \sigma V_z = \sqrt{\left(\frac{dV}{d\varepsilon}\right)^2 \times \sigma_\varepsilon^2 + \left(\frac{dV}{dl}\right)^2 \times \sigma_l^2 + \left(\frac{dV}{dB}\right)^2 \times 3 \times \sigma_B^2} \quad (15)$$

Результаты.

Зная параметры современных лайнеров (размах крыльев ≈ 30 м, скорость полета до 900 км/ч = 250 м/с), а также максимальную величину магнитного поля Земли ($55 \text{ А/м} \approx 7 \times 10^{-5} \text{ Тл}$), и погрешности измерений составляющих величин (среднеквадратические отклонения результатов измерений) можно оценить погрешность определения составляющих вектора скорости V_x , V_y , V_z . Для оценки погрешности определения составляющих вектора скорости выбираются значения величин дающие максимальное значение погрешности.

Опираясь на погрешности измерительных приборов, имеющиеся на Российском рынке в свободной продаже, необходимые для проведения измерений, и приведенные выше числовые значения, можно грубо оценить погрешность определения составляющих вектора скорости по формуле (15).

Производящиеся в настоящее время магнитометры позволяют измерять величину вектора магнитной индукции с разрешающей способностью в несколько единиц нТл. Милливольтметры измеряют с погрешностью до 10 нВ. Погрешность измерения размаха крыльев (длины проводника) можно принять равной 1 мм (погрешность измерения лазерной рулеткой).

$$\sigma V_x = \sigma V_y = \sigma V_z \approx 1,76 \times 10^{-3} \text{ м/с}$$

Следовательно, если в самолёте разместить устройство определения параметров магнитного поля Земли, позволяющее определять скаляр и направление вектора магнитной индукции, а также проводник с измерителем электродвижущей силы, то можно определить моментальные ортогональные составляющие скорости летательного аппарата. Построение линейных участков движения с

одинаковой скоростью и направлением и определение времени движения по этим участкам позволит рассчитать пройденный путь, и, соответственно, точное местоположение относительно начальных координат.

Для корректной работы предложенной системы измерительные датчики ортогональных составляющих вектора магнитной индукции должны быть расположены на гиростабилизированной платформе, по аналогии с инерционными навигационными системами.

Гироскопическое устройство (платформа) предназначено для стабилизации отдельных объектов или приборов в пространстве, то есть для сохранения ориентации в пространстве при движении объекта.

Исходя из вышеописанного, возможно реализовать систему, состоящую из:

- 1 – навигационной или геодезической аппаратуры для определения начальных координат объекта;
- 2 – измерительной системы, позволяющей определить направление и скалярную величину вектора магнитной индукции $\vec{B}$ постоянного магнитного поля Земли, то есть направление движения;
- 3 – стандарта частоты и времени, для определения времени движения.

Обсуждение.

Данный метод определения расширенного вектора состояния движения потребителя $\vec{P}$ имеет недостаток, заключающийся в линейном изменении погрешности место определения (определения текущих координат), зависящим от дрейфа бортовых часов (стандарта частоты и времени), так как имеет место накопление ошибки во времени. Таким образом, применение описанного метода будет ограничено во времени.

Но в инерциальных навигационных системах погрешность определения текущих координат имеет вид квадратической функции от времени, поскольку при определении расширенного вектора состояния движения потребителя $\vec{P}$, для нахождения ортогональных составляющих вектора скорости V_x, V_y, V_z , измеряются ортогональные составляющие ускорения ($\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$). Таким образом, предложенный метод имеет преимущество по сравнению с инерциальными навигационными системами, так как для определения текущих координат потребителя необходимо вычислить первую первообразную от измеряемой функции, то есть рассчитать ортогональные приращения координат объекта через измерение скорости во времени. В решении навигационной задачи с применением инерциальных навигационных систем, происходит расчет ортогональных приращений координат объекта через определение ортогональных составляющих его скорости, которые определяются из измеряемых ортогональных составляющих ускорения.

Выводы.

Следовательно, описан альтернативный метод определения расширенного вектора состояния движения потребителя $\vec{P}$ на основе измерений вектора магнитной индукции естественного магнитного поля Земли, имеющий большую точность по сравнению с инерциальными навигационными системами и не зависящий от внешних источников информации, таких как прием радиосигналов от ГНСС или других источников.

Данный метод позволит определять местоположение и параметры движения объекта без использования карт магнитных градиентов магнитного поля Земли и сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на этапе движения, что делает его привлекательным при разработке перспективных навигационных систем не подверженных влиянию систем радиоэлектронной борьбы.

Литература

1. Фокина Н.Н., Фокин А.П. Теоретические основы решения навигационной задачи через непрерывное измерение вектора магнитной индукции магнитного поля Земли // Вестник метролога № 3 / Менделеево, 2024. – С. 35–39.
2. Серегин В.В. Прикладная теория и принципы построения гироскопических систем // Санкт-петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. Учебное пособие / С-Пб, 2007.

3. Крамарь Е.И. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли: методические указания. / Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2010 – 11 с.
4. Каршаков Е. В. Применение измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задаче навигации летательного аппарата // Управление большими системами: сборник трудов. – 2011. – № 35. – С. 265–282.
5. Сазонова Т. В. Экспериментальные исследования точностных характеристик корреляционно-экстремальных навигационных систем по магнитному полю Земли // Альманах современной метрологии. – 2020. – № 4. – С. 86–96.
6. Джанджгава Г. И., Герасимов Г. И., Августов Л. И. Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 74–84.
7. Бобров Д. С. и др. Макет системы навигации по геофизическим полям // Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии. – 2019. – 10 с.
8. Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов. 11-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.

References

1. Fokina N.N., Fokin A.P. Theoretical foundations of solving the navigation problem through continuous measurement of the magnetic induction vector of the Earth's magnetic field // Bulletin of Metrology No. 3 / Mendeleevo, 2024. – pp. 35–39.
2. Seregin V.V. Applied theory and principles of construction of gyroscopic systems // St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Textbook / S-Pb, 2007.
3. Kramar E.I. Determination of the horizontal component of the Earth's magnetic field: methodological guidelines. / Khabarovsk: Publishing House of the Pacific State University, 2010 – 11 p.
4. Karshakov E. V. Application of measurements of the parameters of the gradient of the Earth's magnetic field in the task of navigation of an aircraft // Management of large systems: proceedings. – 2011. – No. 35. – pp. 265–282.
5. Sazonova T. V. Experimental studies of the accuracy characteristics of correlation-extreme navigation systems in the Earth's magnetic field // Almanac of modern metrology. – 2020. – No. 4. – pp. 86–96.
6. Dzhandzhgava G. I., Gerasimov G. I., Augustov L. I. Navigation and guidance on spatial geophysical fields // Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences. – 2013. – № 3 (140). – S.
7. Bobrov D. S. et al. The layout of the navigation system for geophysical fields // Navigation on the gravitational and magnetic fields of the Earth. New technologies. – 2019. – 10 p.
8. Trofimova T.I. Course of physics: a textbook for universities. 11th ed., ster. – M.: Publishing center "Academy", 2006. – 560 p.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ ИМИТАЦИИ ФОНО-ЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ МИКРОЗЕРКАЛЬНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

CURRENT ISSUES IN DEVELOPING BACKGROUND SIMULATION DEVICES BASED ON MICRO-MIRROR ARRAYS FOR TESTING OPTOELECTRONIC EQUIPMENT

Васильев Д.Ю., Курт В.И., д.т.н., Егосин Д.А., АО «НПО ГИПО», г. Казань
 Vasilyev D.Y., Kurt V.I. (Doctor of Engineering Sciences), Egoshin D.A., JSC "NPO GIPO", Kazan
 e-mail: gipo@shvabe.com, тел.: +79869073810;
 e-mail: gipo@shvabe.com, тел.: +79274116145;
 e-mail: gipo@shvabe.com, тел.: +7 951 068 793.

Аннотация: статья посвящена основным проблемам, с которыми на сегодняшний день сталкиваются разработчики устройств имитации фоно-целевой обстановки на основе микрозеркальных матриц.

Abstract: the article covers the main problems faced today by developers of background simulation devices based on micro-mirror arrays.

Ключевые слова: микрозеркальная матрица, широтно-импульсная модуляция, имитация фоно-целевой обстановки.

Keywords: micro-mirror array, pulse-width modulation, background simulation.

Оптическое излучение позволяет получать большой объём информации о наблюдаемых объектах – их геометрические размеры и форму, энергетическое состояние, скорость и траекторию движения. Возможность принимать и обрабатывать в реальном времени эту информацию делает оптико-электронную аппаратуру (ОЭА) наиболее востребованной среди аппаратуры обнаружения и распознавания сигналов на фоне естественных и организованных помех [1].

В современной практике разработки сложной ОЭА чрезвычайно остро стоят вопросы испытаний создаваемых образцов в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации, в том числе при нестабильности параметров объектов интереса и окружающего их фона, а также отработки алгоритмов принятия решений электронных блоков регистрации и анализа изображений разрабатываемых изделий. Испытания и отработка алгоритмов чаще всего выполняются в натурных условиях при значительных материальных и временных затратах.

Одной из задач метрологического обеспечения ОЭА является создание устройств имитации фоно-целевой обстановки (ФЦО), которые предназначены для лабораторных испытаний разрабатываемых изделий [2, 3]. Такие устройства, по своей сути, являются виртуальными полигонами, позволяющими оценивать качество функционирования блоков регистрации и анализа изображений разрабатываемых изделий. Специальное

программное обеспечение позволяет имитировать объекты интереса различных размеров, то есть находящиеся на различных расстояниях, и на различном окружающем фоне.

Применение устройств имитации ФЦО позволяет обеспечить:

- отработку программных продуктов при создании и совершенствовании интеллектуальных электронных блоков регистрации и анализа изображений разрабатываемых изделий;
- оптимизацию технических параметров разрабатываемых изделий, в том числе с учетом режимов их применения в ситуациях, которые могут быть отнесены к категории критических;
- существенное уменьшение количества натурных испытаний разрабатываемых изделий, сокращение в целом сроков и объемов испытаний, а также снижение их стоимости.

Наиболее предпочтительным типом устройств имитации ФЦО на сегодняшний день являются системы, основанные на применении широтно-импульсной модуляции (ШИМ) оптического излучения [4]. Типовые устройства, использующие технологию ШИМ, включают следующие основные функциональные узлы:

- источник излучения;
- осветительную систему;
- микрозеркальную матрицу;
- выходной объектив.

Ключевым элементом таких устройств является микрозеркальная матрица, представляющая со-

бой двумерный массив управляемых в цифровой форме микрозеркал из алюминиевого сплава, обладающих высоким коэффициентом отражения. Массив микрозеркал закрыт защитным стеклом, прозрачным в требуемой области спектра.

Изначально устройства на основе микрозеркальных матриц разрабатывались и использовались как бытовые видео-приставки к компьютерам для воспроизведения мультимедийного контента на конечном расстоянии, а также применялись для симуляторов движения при тренировках и обучении пилотов и водителей транспортных средств. При таком использовании требования к оптико-механическим составляющим устройства практически не отличаются от стандартных требований для кинофотоаппаратуры. В случае применения технологии ШИМ оптического излучения в устройствах имитации ФЦО возрастают требования к составным частям устройства. В частности, одним из ключевых требований к таким устройствам является обеспечение осветительной системой равномерной освещенности в плоскости установки микрозеркальной матрицы.

Помимо этого, зачастую устройства имитации ФЦО применяются в среднем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазонах, и для работы в указанных областях спектра необходимо провести модернизацию микрозеркальной матрицы. Стандартные микрозеркальные матрицы, как правило,

применяются в спектральных диапазонах от ультрафиолетового до ближнего ИК [5]. Для обеспечения их работы в среднем или дальнем ИК диапазонах требуется трудоемкая операция по замене защитного окна. В ходе этой операции в условиях вакуума или инертного газа удаляется стандартное защитное окно и на его место устанавливается пластина, изготовленная из материала, прозрачного в требуемой области спектра [6].

Принципиальная оптическая схема типового устройства имитации ФЦО приведена на рисунке 1.

Принцип работы типового устройства имитации ФЦО описан в [7] и заключается в следующем:

Микрозеркальная матрица освещается в рабочем спектральном диапазоне исследуемого изделия равномерным потоком излучения, создаваемым с помощью источника излучения, поз. I, конденсора, поз. II, и зеркального тоннеля, поз. III, и проецируемым в плоскость микрозеркальной матрицы с помощью зеркал IV, V. С управляющего персонального компьютера, поз. 4, имитируемая сцена посредством специального программного обеспечения передается на контроллер, поз. 3, обрабатывающий полученные данные и задающий микрозеркалам матрицы различные частоты модуляции, создавая заданное распределение энергии в фокальной плоскости коллимационного объектива. Полученное таким образом имитационное изобра-

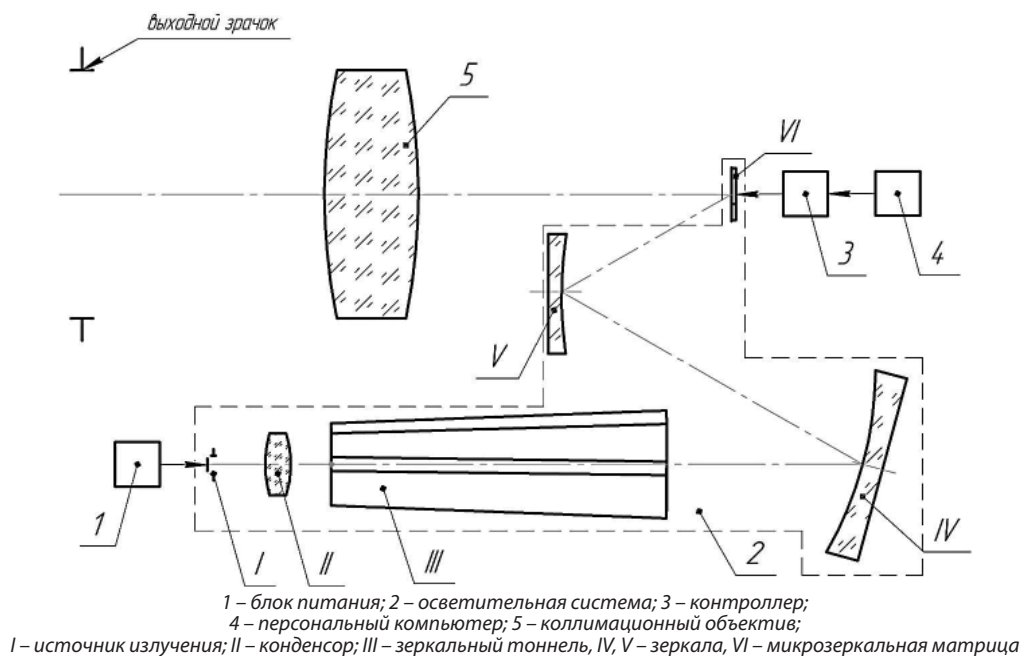


Рисунок 1 – Оптическая схема типового устройства имитации ФЦО

жение через коллимационный объектив, поз. 5, проецируется в выходной зрачок системы имитации ФЦО, совмещенный с входным зрачком исследуемого изделия.

В АО «НПО ГИПО» выполнен ряд исследований по разработке принципов построения одноканальных и двухканальных устройств имитации ФЦО, генерирующих имитационные изображения в различных спектральных диапазонах [8–11]. Для дальнейшего развития систем имитации ФЦО необходимо решить задачи, которые будут представлены ниже.

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных вопросов является необходимость повышения эффективности применения микрозеркальных матриц при работе в спектральном диапазоне от 8 до 12 мкм. Проблема обусловлена тем, что геометрические размеры микрозеркал соизмеримы с длинами волн указанного спектрального диапазона, вследствие чего, часть излучения, отраженная зеркально от них, составляет лишь малую часть от падающего на микрозеркальную матрицу излучения, а основная часть уходит в дифрагированное излучение. В видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах дифракционные потери незначительны – согласно данным производителя они составляют не более 10–20% в зависимости от размеров микрозеркал применяемой матрицы [12]. Для среднего и, особенно, дальнего ИК спектральных диапазонов ситуация принципиально иная, поскольку дифракционные потери могут достигать до 90%. Для минимизации негативного влияния дифракционных эффектов в этом спектральном диапазоне необходимо использование микрозеркальных матриц с шагом микрозеркал более 13,6 мкм, однако в настоящее время такие матрицы не производятся. В качестве альтернативы следует рассмотреть возможность бининга микрозеркал. Успешное применение бининга позволит увеличить шаг микрозеркал в 2 раза, что будет соразмерно кружкам рассеяния объективов в дальнем ИК диапазоне. Для подтверждения этого предположения необходимо провести дополнительные исследования, в рамках которых будет разработана и практически опробована новая плата управления микрозеркальной матрицы. Решение этой проблемы позволит существенно повысить эффективность

применения микрозеркальных матриц в указанных спектральных диапазонах.

Другой актуальной задачей является повышение предельных технических характеристик коллимационных объективов, в частности диаметра выходного зрачка и поля зрения, что позволит увеличить номенклатуру исследуемых изделий. Базовыми характеристиками, ограничивающими геометрию построения системы имитации ФЦО, являются конструктивные особенности микрозеркальных матриц – ее геометрические размеры и угол отклонения микрозеркал. Стандартное устройство на основе микрозеркальной матрицы представляет собой центрированную оптическую систему, в которой осевой луч пучка, отраженного от центрального элемента микрозеркальной матрицы в сторону коллимационного объектива, совпадает с оптической осью объектива. При оптимальном относительном отверстии коллимационного объектива, которое с учетом угла отклонения микрозеркал не должно превышать $\frac{1}{2,4}$, не происходит переналожения излучения, освещающего микрозеркальную матрицу, и отраженного от нее, как показано на рисунке 2.

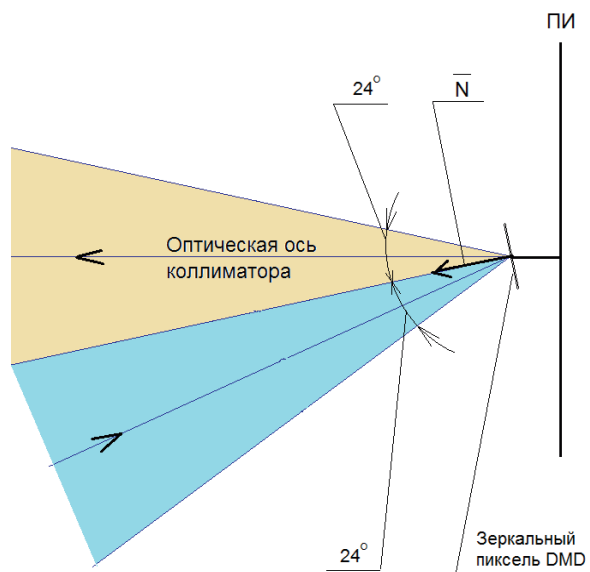


Рисунок 2 – Излучение от осветительной системы и излучение, отраженное от матрицы, при оптимальном относительном отверстии коллимационного объектива

Однако при больших размерах поля зрения коллимационного объектива необходимо или существенно уменьшать относительное отвер-

ствие, или, во избежание переналожения излучения и, следовательно, нарушения равномерности освещения микрозеркальной матрицы, формировать оптическую систему, как внеосевую, что существенно усложняет оптическую схему объектива. В частности, это приводит к увеличению его массы и габаритов, а также к увеличению оптических аберраций, для исправления которых необходимо применение деталей со сложными асферическими поверхностями и (или) увеличение количества линз. Помимо этого, значительно усложняются сборка и юстировка коллимационного объектива.

В качестве альтернативы предполагается рассмотреть возможность создания системы имитации ФЦО с увеличенным промежуточным изображением микрозеркальной матрицы, что позволит добиться требуемых технических характеристик коллимационного объектива в спектральных диапазонах от видимого до среднего ИК. Для решения аналогичной задачи в спектральном диапазоне от 8 до 12 мкм помимо вышесказанного необходимо использование микрозеркальной матрицы с шагом микрозеркал не менее 13,6 мкм и источника излучения с большей излучающей поверхностью.

Помимо этого, актуальной проблемой является обеспечение синхронизации частоты ШИМ в изображении, формируемом системой имитации ФЦО, с частотой работы фотоприемного устройства (ФПУ) исследуемого изделия. Отсутствие синхронизации приводит к мерцанию и искажению воспроизводимого изображения из-за асинхронности между частотой обновления кадров, генерируемых системой имитации, и частотой считывания данных ФПУ, следствием чего является частичная потеря информации и снижение достоверности результатов исследований. Достижение синхронизации может быть реализовано за счет разработки платы управления, обеспечивающей генерацию сигналов ШИМ с частотой, кратной частоте работы ФПУ, что позволит исключить указанные негативные эффекты и повысить эффективность применения системы имитации ФЦО.

Проведение лабораторных испытаний с помощью устройств имитации ФЦО позволяет разработчикам оценивать и оптимизировать характеристики разрабатываемых изделий на этапе

их конструкторской проработки, а также своевременно выявлять их недостатки, существенно снизив затраты на проведение натурных испытаний. Решение вышеуказанных задач позволит повысить качество имитационных изображений и достоверность исследований с применением устройств имитации ФЦО, существенно расширить их функциональные возможности и номенклатуру исследуемых изделий.

Литература

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. — М.: Логос, 2004. 453 с.
2. Васильев Д.Ю., Курт В.И., Егошин Д.А. К вопросу разработки стендов имитационного моделирования // Вестник метролога, 2020. № 3. С. 27–32.
3. Гибин И.С., Колесников Г.В. Современные устройства измерения параметров и комплексного тестирования инфракрасных ФПУ и приборов (обзор) // Успехи прикладной физики, 2014. Том 2, № 3. С. 293–302.
4. Гибин И.С., Козик В.И., Нежевенко Е.С. Источники излучения для проекторов инфракрасных сцен // Прикладная физика, 2019, № 2. С. 67–73.
5. Advanced light-control | Overview [Электронный ресурс] // Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/dlp-chip/advanced-light-control/overview.html>
6. Гибин И.С., Козик В.И., Нежевенко Е.С., Сидоренко В.М., Хатункин В.В. Микрозеркальный модулятор для инфракрасных имитационно-моделирующих стендов // Научный вестник НГТУ, 2018. Том 71, № 2. С. 75–84.
7. Васильев Д.Ю., Воронько М.Ю., Егошин Д.А., Козырев В.П., Курт В.И. Устройство имитации динамической сцены: патент РФ на изобретение № 2789277. 2023. Бюл. № 4.
8. Балоев В.А., Иванов В.П., Курт В.И., Воронько М.Ю., Козырев В.П. Инфракрасный объектив: патент РФ на изобретение № 2779740. 2022. Бюл. № 26.
9. Васильев Д.Ю., Воронько М.Ю., Егошин Д.А., Курт В.И. Объектив для коротковолнового инфракрасного диапазона спектра: патент РФ на изобретение № 2802801. 2023. Бюл. № 25.
10. Васильев Д.Ю., Воронько М.Ю., Егошин Д.А., Козырев В.П., Курт В.И. Телецентрический объектив с вынесенным зрачком: патент РФ на изобретение № 2802802. 2023. Бюл. № 25.
11. Курт В.И., Егошин Д.А., Васильев Д.Ю. Устройство имитации фоно-целевой обстановки: патент РФ на изобретение № 217959. 2023. Бюл. № 12.
12. DMD Optical Efficiency for Visible Wavelengths (Rev.A). Application Report [Электронный ресурс] // Texas Instruments, May 2019. URL: <https://www.ti.com/lit/an/dlpa083a/dlpa083a.pdf>

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, ученого звания, места работы, контактных телефонов, электронного адреса.

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

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

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

Все условные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснить в основном или подстрочных 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/>

