

ВМ 2/2026 (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.
О.В. Денисенко, доктор технических наук.
Ю.А. Клейменов, доктор технических наук.
Д.А. Кузнецов, заместитель начальника
Управления государственной политики
в сфере технического регулирования,
стандартизации и обеспечения единства
измерений.
Е.Р. Лазаренко, заместитель руководителя
Федерального агентства по техническому
регулированию и метрологии.
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. Ципунов, доктор технических наук.

Главный редактор

В.Н. Храменков, доктор технических
наук, профессор

Заместитель главного редактора

О.В. Надеина, кандидат педагогических
наук

В подготовке номера участвовали:

Крупская Д.Л.

Адрес редакции: 141006, г. Мытищи
Московской обл., Олимпийский проспект,
владение 13, строение 1, оф. 307

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

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

Тел. +79857656675

E-mail: 32gnii_vm@mail.ru

Отпечатано ООО «ПРИНТ»

Юридический адрес: 125413, Россия,
г. Ижевск,

Сдано в набор 07.04.2026

Подписано в печать 17.04.2026

Тираж 300 экз.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Информационное сообщение 3

Общие вопросы метрологии

*Зуйков М.Ю., аспирант ФГБОУ ВО «РЭУ им Г.В. Плеханова»,
Рыбачёв И.И., аспирант ФГБОУ ВО «УГТУ»,
Храменков А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России*
**Автоматизированные системы менеджмента качества.
Шаг в будущее 4**

*Малахов А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Московский политехнический университет
Ершов Д.С., к.т.н., Московский политехнический университет
Хайруллин Р.З., д.ф.-м.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны
России, Московский государственный строительный
университет, Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана,
Минагуреев Н.А., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России*
**Применение метрик бинарного классификатора в задачах
моделирования функционирования сложных технических
систем с метрологическим самоконтролем 8**

*Храменков В.Н., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны,
Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России*
**Процедура калибровки средств измерений в
соответствии с метрологическими требованиями 15**

*Корнев А.С., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Малахов А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Московский политехнический университет,
Фуфаева О.В., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России*
**Методический подход к анализу номенклатуры средств
измерений, применяемых для метрологического
обеспечения эксплуатации изделий специальной техники . . 19**

*Шпилевский О.Б., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Руденкова Е. Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России*
**Достижения развития отрасли в области лазерной,
оптической и оптоэлектронной техники предприятий
России (Фотоника – 2026) 22**

Измерения времени и частоты

*Щурин К. В., д.т.н., профессор,
Воейко О.А., к.т.н., доцент, ТУ им. А.А. Леонова (филиал) МИИГАиК,
Михеева Н.В., аспирант, ТУ им. А.А. Леонова (филиал) МИИГАиК*
**Методологические основы косвенных измерений в
экстремальных областях 28**

*Васильев А.В., Клейменов Ю.А., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ»
Минобороны России*
**Общий подход к моделированию автономного поведения
стандартов частоты 35**

VM 2/2026

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, deputy of the chief of
Management state politicians in sphere of
the technical regulation, standardizations
and provision unity measurements.

E.R. Lazarenko, deputy of the leader
Federal agency on technical regulation
and metrologies.

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, Mytitski
Moscow obl., Olympic avenue, possession
12, construction 1

Address: 141570, Moscow region,
Solnechnogorsk district., Township
Mendeleevo
telephone +79857656675
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

Information message 3

Common questions of a metrology

Zuikov M.Y., postgraduate student of the Plekhanov Russian
University of Economics

Rybachev I.I., postgraduate student of the Ukhta State Technical
University,

Khramenkov A.V., c.t.s., FSBI «MSHC» of Russia Federation
Ministry of Defense of Russia

The Automatic systems of management quality.

The Step in future 4

Malahov A.V., c.t.s., FSBI «MSHC» of Russia Federation

Ministry of Defense of Russia, Moscow polytechnic university,

Ershov D.S., k.t.n., Moscow polytechnic university, Hayrullin

R.Z., d.f.-m.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of the

Russian Federation, Moscow state technical university im. N.E. ,

Minagureev N.A., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of the
Russian Federation

Using the metricses of the binary qualifier in problem of modeling of the operating the complex technical systems with metrological self-verification 8

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

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

Ministry of Defense of the Russian Federation

Procedure of the calibration of the facilities of the measurements in accordance with metrological requirements . 15

Kornev A.S., candidate of technical sciences, Federal State
Budget Institution «Main Scientific Metrological Center» of the

Ministry of Defense of the Russian Federation,

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,

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

Methodological approach to the analysis of the range of measuring instruments used for metrological maintenance of special equipment products 19

Shpilevskiy O.B., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense

of the Russian Federation, Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI «MSHC»

of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

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

of the Russian Federation

Achievements of the development to branches in the field of lazer, optical and optoelectronic technology enterprise to Russia (Fotonika – 2026) 22

Measurements of time and frequencies

Shchurin K.V., Doctor of Technical Sciences, Professor,

Voeyko O.A., c.t.s., Ph.D. in Engineering, Associate Professor,

TU A.A.Leonov (Branch) MIIGAik,

Mikheeva N.V., post-graduate student TU A.A.Leonov (Branch) MIIGAik

Methodological foundations of indirect measurements in extreme areas 28

Vasilev A.V., Kleymenov YU. A., Doctor, FSBI «MSHC» of the
Ministry of Defense of Russia

General approach to modeling the autonomous behavior of frequency standards 35

ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ XVI ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБОРОНЫ И БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ» ПРИГЛАШАЕТ ВАС ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИИ, КОТОРАЯ СОСТОИТСЯ С 18 ПО 20 НОЯБРЯ 2026 ГОДА В ПАРК-ОТЕЛЕ «СОФРИНО», РАСПОЛОЖЕННОМ В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ, Г/О ПУШКИНСКИЙ, ТЕРРИТОРИЯ ПАРК-ОТЕЛЯ «СОФРИНО»

ОРГАНИЗАТОРЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Управление метрологии Вооруженных Сил
Российской Федерации



ФГБУ «Главный научный метрологический центр»
Министерства обороны Российской Федерации
(ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России)

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

- ООО «ПРОМЭЛКОМ»

ОРГКОМИТЕТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПРЕДСЕДАТЕЛЬ

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

ЧЛЕНЫ:

- Васильев Игорь Олегович – советник Департамента развития научно-производственной базы ЯОК Госкорпорации «Росатом», д.т.н.
- Донченко Сергей Иванович – генеральный директор ФГУП «ВНИИФТРИ», д.т.н.
- Клейменов Юрий Анатольевич – заместитель начальника ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (по научной работе), д.т.н.
- Кокорев Андрей Александрович – главный метролог Головной организации Метрологической службы Госкорпорации «Ростех»
- Кривов Анатолий Сергеевич – заместитель генерального директора АО НПФ «Диполь», председатель Межотраслевого совета по прикладной метрологии и приборостроению, д.т.н.
- Кузнецов Дмитрий Александрович – заместитель начальника Управления государственной политики в сфере технического регулирования, стандартизации и обеспечения единства измерений Минпромторга России
- Лазаренко Евгений Русланович – заместитель руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии
- Подосинников Виталий Александрович – исполнительный директор ООО «ПРОМЭЛКОМ»

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

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

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

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

эффективных систем менеджмента качества организаций ОПК и обеспечении качества выполнения заданий ГОЗ.

ФОРМЫ УЧАСТИЯ В КОНФЕРЕНЦИИ

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

ВАЖНЫЕ ДАТЫ:

- до 01 сентября 2026 г. – направление регистрационной формы (заявки) для участия в конференции;
- до 15 сентября 2026 г. – направление тезисов докладов и рекламы в материалы конференции, а также предложений в проект решения и рекламных листов для вложения в раздаточный материал;
- до 01 октября 2026 г. – срок подачи заявок, оформления договоров и оплаты участия в конференции;
- до 10 ноября 2026 г. – формирование программы конференции;
- 18-20 ноября 2026 г. – проведение Всероссийской научно-технической конференции.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА КОНФЕРЕНЦИИ

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

РЕГЛАМЕНТ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Заезд участников конференции с проживанием – 17 ноября 2026 года, начиная с 18.00.
2. Регистрация участников конференции – по месту проведения конференции 17 ноября 2026 г. с 18.00 (для участников конференции с проживанием) и 18 ноября 2026 года с 08.00 до 10.00 (для всех участников конференции).
3. Начало пленарных заседаний – 18 и 20 ноября 2026 г. в 10.00.
4. Работа по секциям – 19 ноября 2026 года (в соответствии с Программой конференции).

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

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

ИНФОРМАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С УЧАСТНИКАМИ. СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

1. Основанием для включения в состав участников конференции являются оформленные заявка и договор с ООО «ПРОМЭЛКОМ» и оплата указанной в договоре услуги. Оплата производится по счету путем перечисления денежных средств на расчетный счет ООО «ПРОМЭЛКОМ» платежным поручением.
2. Заявки на участие в конференции и рекламный материал высылать по адресу: 141002, Московская область, г. Мытищи, ул. Комарова, д. 2, корп. 2, пом. 1, ООО «ПРОМЭЛКОМ», или по E-mail: promelcom@pecomponent.ru, или нарочным.
3. Тезисы докладов высылать по адресу: 141006, Московская область, г. Мытищи, ул. Комарова, 13, или e-mail: 32gnii@mail.ru, или нарочным.
- Важно. К материалам докладов, представляемым на пленарное заседание и секции 1 и 2, в обязательном порядке должны прилагаться акты экспертизы о возможности опубликования в открытой печати.
4. Справки по общим вопросам участия в конференции, оформления заявок, договоров, рекламных материалов и оплаты участия в конференции по тел. 8(499)653-81-00 (Подосинников Виталий Александрович моб. тел. 8-985-767-66-63, Кизмаковская Анжелика Леонидовна), или по E-mail: htp2008@mail.ru; ka105@pecomponent.ru.
5. Предложения в программу и проект решения конференции, справки по программе конференции, по вопросам оформления тезисов докладов конференции, по проекту решения конференции (Бородинкова Ирина Владимировна моб. тел. 8-916-438-50-83) или по E-mail: 32gnii@mail.ru.
6. Экспонаты представляются и выставляются в день открытия конференции.
7. Программа конференции будет опубликована до ее начала на сайте ООО «ПРОМЭЛКОМ», www.pecomponent.ru.
8. Более подробная информация о конференции размещена на сайте ООО «ПРОМЭЛКОМ»: www.pecomponent.ru в информационном сообщении.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА. ШАГ В БУДУЩЕЕ AUTOMATED QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS. A STEP INTO THE FUTURE

Зуйков М.Ю., аспирант ФГБОУ ВО «РЭУ им Г.В. Плеханова»,
Zuikov M.Y., postgraduate student of the Plekhanov Russian University of Economics
maxzuikov@yandex.ru, +7 (916) 095-86-25

Рыбачёв И.И., аспирант ФГБОУ ВО «УГТУ»,
Rybachev I.I., postgraduate student of the Ukhta State Technical University,
ilyarybachev@mail.ru

Храменков А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Khramenkov A.V., Candidate of Technical Sciences, SSC of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
Khramenkov@gmail.com, +7 (915) 033-71-17

Аннотация. Цифровая трансформация в сферах государственного регулирования привела к повышению уровня доверия со стороны населения и проверяющих органов и стала основой в оценивании прослеживаемости результатов работ по поверке средств измерений, испытаниям средств измерений, стандартных образцов в целях утверждения типа, аттестации методик (методов измерений и метрологической экспертизе документации, а также сокращению сроков и уменьшению затрат в работах по аккредитации, подтверждению компетентности заявителей, аккредитованных лиц в Национальной системе аккредитации. Система менеджмента качества любой организации, осуществляющая деятельность в области обеспечения единства измерений, содержит правила управления персоналом, документацией, оборудованием, помещениями и другими основополагающими процессами, в соответствии с требованиями приказа Минэкономразвития России от 26 октября 2020 года №707, управление которыми входит в должностные обязанности руководителя метрологической службы и (или) менеджера по качеству. Цель данной работы заключалась в рассмотрении основных подходов к автоматизации системы менеджмента качества метрологической службы. В ходе исследования проведен анализ требований приказа Министерства экономического развития Российской Федерации от 26.10. 2020 г. № 707 «Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствия заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации». Обосновано применение программного продукта, отвечающего требованиям по автоматизации процессов хозяйственной деятельности. По результатам исследования установлена возможность применения автоматизированных систем менеджмента качества за пределами работ, оказания услуг в области обеспечения единства измерений, в масштабе полноценного внедрения в хозяйственную деятельность организации. Сделан вывод, что будущее системы менеджмента качества связано с внедрением автоматизированных систем менеджмента качества. Наглядно это доказывают результаты внедрения автоматизированной системы менеджмента качества на примере ПО MaxExpert Automated Quality Management System.

Annotation. The digital transformation in the areas of government regulation has led to an increase in the level of trust of citizens and inspection authorities and has become the basis for assessing the traceability of the results of work on verification of measuring instruments, testing of measuring instruments, standard samples for type approval, certification of methods (measurement methods and metrological examination of documentation, and also reducing time and cost of state service of accreditation, confirmation of the competence of applicants, accredited companies in the National Accreditation System. The quality management system of any organization engaged in the field of ensuring the uniformity of measurements contains rules for managing human resources, documentation, equipment, premises, and other fundamental processes, in accordance with the requirements of Order No. 707 of the Ministry of Economic Development. The purpose of this work was to consider the main approaches to automating the quality management system of the metrological department. The study analyzed the requirements of Order No. 707 of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation dated October 26, 2020, "On Approval of the Accreditation Criteria and the List of Documents Confirming the Applicant's and Accredited Person's Compliance with the Accreditation Criteria." The study substantiated the use of software product that fulfill all business processes. The results of the study demonstrated the possibility of using automated quality management systems beyond the scope of work and services in the field of ensuring the uniformity of measurements, with a full-fledged implementation in the organization's business activities. It is concluded that the future of quality management systems is associated with the implementation of automated quality management systems. This is clearly demonstrated by the results of the implementation of an automated quality management system using the MaxExpert Automated Quality Management System software product.

Ключевые слова: цифровая трансформация, область обеспечения единства измерений, автоматизированная система менеджмента качества, программный продукт MaxExpert Automated Quality Management System.

Key words: digital transformation, metrology, automated quality management system, software product MaxExpert Automated Quality Management System.

Наличие и соблюдение требований системы менеджмента качества является одним из основных условий успешного прохождения процедуры аккредитации, подтверждения компетентности в национальной системе аккредитации. Многогранность критериев аккредитации в части системы менеджмента качества предусматривает установление правил: управления персоналом, документацией, помещениями, оборудованием; проведения внутренних аудитов, контролей качества, корректирующих мероприятий и анализов рисков; создания системы учета заявок; рассмотрения претензий и жалоб и др. Взаимосвязь критериев аккредитации и объемность входных данных для своевременного и корректного занесения в документы системы менеджмента качества организации переводит процесс управления данными в категорию управления Big Data. Внедрение автоматизированных технологий позволяет минимизировать человеческий фактор в процессе функционирования системы менеджмента качества организации и соблюдения ее требований.

Как отмечает Метревели И.С. «Цифровая трансформация системы менеджмента качества организации позволяет открыть новые возможности для глубины и интенсивности контроля, а также позволяет снизить возможный уровень брака при выполнении работ» [1].

По своей сути, автоматизированные системы менеджмента качества представляют собой взаи-

мосвязанную цифровую модель управления метрологической службой посредством внедрения различных цифровых инструментов. Следует согласиться с мнением Плехановой С.В. [2] в том, что к основным цифровым инструментам, влияющим на систему менеджмента качества, относятся интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (ИИ), большие данные (Big Data) и облачные вычисления.

Эффективность автоматизированных систем менеджмента качества зависит от количества внедренных цифровых инструментов и их взаимосвязи с входными данными, предоставляемыми организацией. Входные данные представляют собой фундамент, без которого невозможно начать автоматизировать деятельность за счет технологий Индустрии 4.0.

Перечисленные выше цифровые инструменты позволяют значительно сократить время необходимое для управления процессами системы менеджмента качества организации, понизить издержки, связанные с оформлением документов в рамках управления процессами системы менеджмента качества, и минимизировать человеческий фактор.

Президент Метрологической академии В.В. Окрепилов [3] отмечает, что в Российской Федерации проводится порядка 50–60 млн. проверок в год. По информации за 2025 год эта цифра приблизилась к 100 млн. Организации,



Рисунок 1 – Взаимодействие цифровых инструментов индустрии 4.0 и физических объектов

выполняющие работы в области обеспечения единства измерений, осуществляя и применяя данные о результатах поверки, сталкиваются с проблемой управления большими данными. Хранение данных также требует внедрение облачных сервисов. Облачные решения уже стали стандартом в деятельности организаций, выполняющих работы (оказывающих услуги) в области обеспечения единства измерений как отмечает А.А. Попов [4]. Документы системы менеджмента качества содержат информацию, взаимосвязанную с процессами оформления результатов выполненных работ, и подлежат хранению и последующему архивированию в соответствии с требованиями системы менеджмента качества организации.

Как утверждает А.М. Базарова [5], умные датчики могут быть использованы для формирования интернета измерительных задач. Процесс автоматизированного съема показаний с измерителя температуры и влажности ускоряет заполнение необходимых документов системы менеджмента качества, а также исключает возможность получения недостоверных результатов при передаче единицы величины в условиях, несоответствующих установленным требованиям.

А.Ю. Кузин, А.Н. Крошкин [6] уверены, что технологии искусственных нейронных сетей решают обширную группу задач, таких как компьютерное зрение, расчетно-логические системы, робототехника, машинное обучения и т.д. Внедрение ИИ в жизнедеятельность метрологической службы является приоритетной задачей с учетом состояния процессов системы менеджмента качества организации и данных о физических объектах организации.

Однако, технология цифрового двойника также является перспективным направлением для внедрения в системы менеджмента качества, выполняющие регулирующие задачи в области обеспечения единства измерений. Цифровой двойник – это полноценный процесс реализации предупреждающих действий в рамках рассмотрения рисков и возможностей организации. Б.Я. Литвинов, Н.Н. Скориантов, Р.Н. Целмс [7] подчеркивают, что цифровой двойник – это виртуальная модель, предусматривающая неопределенность имеющихся данных.

Несомненно, что применение технологий Индустрии 4.0 позитивно влияет на физические объекты системы менеджмента качества. Однако, стоит отметить, что цифровые инструменты должны



Рисунок 2 – Цифровые технологии внедрения ИИ в организации

внедряться после получения детализированной информации о состоянии физических объектов. Автоматизированные системы менеджмента качества – это цифровая модель управления метрологической службой, предусматривающая воздействие технологий Индустрии 4.0 на объекты, помещения, персонал, документацию и т.д.

Подобным функционалом обладает программный продукт MaxExpert Automated Quality Management System, позволяющий автоматизировать деятельность метрологической службы с целью ее эффективного функционирования. Пользователь регистрируется в системе, вводя сведения о физических объектах организации. Управление большими данными, искусственный интеллект, облачное хранение, цифровой двойник, интернет вещей помогают сделать процессы управления физическими объектами автоматизированными и дают возможность для анализа всех цепочек взаимодействия между процессами. Руководитель метрологической службы, менеджер по качеству получает инструмент, позволяющий существенно минимизировать время на ведение отчетной документации системы менеджмента качества, отдавая предпочтение анализу таких процессов как контроль качества, информационное взаимодействие с заказчиков, управление заказами.

Полагаем, что в ближайшем будущем автоматизированные системы менеджмента качества прочно войдут в обязательный перечень программных продуктов, приобретаемых организациями, для ведения хозяйственной деятельности. Внедрение автоматизированных систем во все процессы жизнедеятельности организации (жизненные циклы продукции) является актуальным решением в целях экономии времени и создания предпосылок для развития организации в других направлениях деятельности.

Литература

1. Метревели И.С. Цифровая трансформация системы менеджмента качества / И. С. Метревели / В сборнике докладов международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025, с. 113–117.
2. Плеханова С.В. Разработка методологических подходов к интеграции систем менеджмента качества с цифровыми технологиями Industry 4.0 / С.В. Плеханова / Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025, с. 815–825
3. Окрепилов В.В. Развитие цифровой метрологии – путь в новое качество экономики / В.В. Окрепилов / Инновационное приборостроение, 2022. С. 7–16.
4. Попов А.А. Цифровизация обеспечения метрологической прослеживаемости средств измерений и стандартных образцов через облачные технологии: современное состояние и перспективы развития / А.А. Попов / Эталоны. Стандартные образцы, 2022. С 57–70.
5. Базарова А.М. Влияние увеличения скорости обработки программных данных на метрологическое обеспечение предприятия / А.М. Базаров / Естественные и технические науки, 2024. С 161–172.
6. Кузин А.Ю., Крошкин А.Н. Искусственный интеллект как один из элементов цифровой трансформации в метрологии / А.Ю. Кузин, А.Н. Крошкин / Инновационное приборостроение, 2022. С 27–35.
7. Литвинов Б.Я., Скориантов Н.Н., Целмс Р.Н. Метрологическая деятельность в условиях цифровой трансформации / Б.Я. Литвинов, Н.Н. Скориантов, Р.Н. Целмс / В сборнике тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, 2024. С 274–275.

Reference

1. Metreveli I.S. Digital Transformation of the Quality Management System / I.S. Metreveli / In the collection of reports of the international scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025, p. 113–117.
2. Plekhanova S.V. Development of methodological approaches to the integration of quality management systems with digital technologies of Industry 4.0 / S.V. Plekhanova / Economy: yesterday, today, tomorrow. 2025, p. 815–825
3. Okrepilov V.V. Development of digital metrology – the way to a new quality of the economy / V.V. Okrepilov / Innovative instrument-making, 2022. Pp. 7–16.
4. Popov A.A. Digitalization of ensuring metrological traceability of measuring instruments and standard samples through cloud technologies: current state and development prospects / A.A. Popov / Standards. Standard samples, 2022. Pp. 57–70.
5. Bazarova A.M. The Influence of Increasing the Speed of Processing Program Data on the Metrological Support of an Enterprise / A.M. Bazarov / Natural and Technical Sciences, 2024. Pp. 161–172.
6. Kuzin A.Yu., Kroshkin A.N. Artificial Intelligence as One of the Elements of Digital Transformation in Metrology / A.Yu. Kuzin, A.N. Kroshkin / Innovative Instrument Engineering, 2022. Pp. 27–35.
7. Litvinov B.Ya., Skoriantov N.N., Tselms R.N. Metrological Activities in the Context of Digital Transformation / B.Ya. Litvinov, N.N. Skoriantov, R.N. Tselms / In the Collection of Abstracts of the IV International Forum. In 2 parts, 2024. Pages 274–275.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТРИК БИНАРНОГО КЛАССИФИКАТОРА В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ САМОКОНТРОЛЕМ METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE RANGE OF MEASURING INSTRUMENTS USED FOR METROLOGICAL MAINTENANCE OF SPECIAL EQUIPMENT PRODUCTS

Малахов А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Московский политехнический университет,
 Ершов Д.С., к.т.н., Московский политехнический университет,
 Хайруллин Р.З., д.ф.-м.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
 Московский государственный строительный университет, Московский государственный
 технический университет им. Н.Э. Баумана
 Минагуреев Н.А., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
 Malahov A.V., c.t. s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of Russia, Moscow polytechnic university, Ershov D.S., c.t. s.,
 Moscow polytechnic university, Hayrullin R.Z., d.f.-m.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of Russia
 The Moscow state building university, Moscow state technical university im. N.E. Bauman,
 Minagureev N.A., FSBI «MSHC» of the
 Ministry of Defense of Russia
 Sanya-mal1@yandex.ru, ershov.metrolog@mail.ru, zrkzrk@list.ru, Minagureev99@mail.ru,
 Тел. 8-977-529-75-69; 8-919-722-12-10; 8-989-726-38-53 +7 (919) 722-12-02

Аннотация. Предложена расширенная полумарковская модель функционирования измерительной системы, учитывающая процессы метрологического самоконтроля. Для количественной оценки эффективности метрологического самоконтроля используются коэффициент готовности и метрики бинарного классификатора, адаптированные к моделям сложных технических систем, позволяющие оценивать достоверность результатов контроля.

Annotation. An extended semi-Markov model of the measurement system's operation is proposed, taking into account the processes of metrological self-monitoring, failure detection, and recovery. To quantitatively assess the effectiveness of metrological self-monitoring, the availability factor and binary classifier metrics adapted to models of complex technical systems are used, allowing for the assessment of the reliability of the monitoring results.

Ключевые слова: метрологический самоконтроль, метрики, бинарная классификация.

Keywords: metrological self-control, metrics, binary classifiers.

В современных сложных технических системах (СТС) измерительные системы (ИС) и каналы играют ключевую роль, обеспечивая поступление, обработку и передачу данных о состоянии оборудования. Надёжность измерений становится критически важной, поскольку неточные или несвоевременные показания могут привести к сбоям и авариям всего комплекса [1]. Военное назначение накладывает на СТС дополнительные ограничения: ограниченность техобслуживания, длительные интервалы между поверками, требования к автономности и встроенному контролю. В этих условиях традиционные стратегии регулярных проверок недостаточны, поэтому необходимы методы постоянного мониторинга метрологических характеристик и оперативной диагностики. Метрологический самоконтроль (МСК) – встроенная функция самодиагностики состояния датчиков, становится эффективным средством выявления деградации метрологических параметров без прерывания работы системы [2].

Существующие исследования затрагивают отдельные аспекты этой проблемы. Известны полумарковские модели эксплуатации СТС, позволяющие учесть длительность операций поверки и ремонта [3]. Отдельные работы посвящены вопросам диагностирования и оценки достоверности контроля и доверия к измерениям [4, 5]. Однако в литературе отсутствует единая модель, объединяющая полумарковский подход с учётом МСК и позволяющая оценить эффективность системы контроля. В частности, не разработаны связи между параметрами модели, показателями метрологической надёжности и метриками качества контроля, а также нет формализованной методики оптимизации периодичности диагностирования в этом контексте.

В связи с изложенным, цель данной работы – построить полумарковскую модель функционирования измерительной системы с учётом МСК и возможностью оценить достоверность измерительной информации. Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Формализация расширенной полумарковской модели эксплуатации СТС, включающая состояния, связанные с метрологическим самоконтролем.

2. Определение показателей метрологической надёжности (коэффициента готовности, среднего времени безотказной работы) через параметры модели.

3. Адаптация к модели привычных метрик бинарной классификации [5]: accuracy, precision, recall, F1, а также анализ релевантности кривых ROC/PR для ситуации с редкими отказами.

Описание модели

Описание процесса эксплуатации СТС с МСК предполагает его представление в виде двухконтурной полумарковской модели для моделирования процессов МСК и поверки. Распределение МСК СТС в процессе их эксплуатации позволяет решить задачу адаптации периодичности и объема проведения МСК в рамках всех видов обслуживания.

Опишем возможные состояния СТС с МСК в процессе эксплуатации: E_1 – исправное состояние; $E_1^{(1)}$, $E_1^{(2)}$, $E_1^{(3)}$, $E_1^{(4)}$ – вспомогательные исправные состояния, введенные для возможности моделирования разного времени нахождения в исправном состоянии перед переходом в неисправное состояние и на поверку;

$E_2^{(1)}$, $E_2^{(2)}$ – состояния неисправности перед переходом СТС в состояния поверки и состояние МСК; E_3 – поверка неисправной СТС; E_4 – восстановление СТС; E_5 – поверка исправной СТС; E_6 – состояние ложного отказа; $E_6^{(1)}$, $E_6^{(2)}$ – вспомогательные состояния необнаруженного отказа перед переходом в состояние поверки или МСК; E_7 – состояние ложного отказа; E_{33} – МСК неисправной СТС; E_{44} – автоматизированное восстановление после обнаружения неисправности по-

сле МСК; $E_{44}^{(1)}$, $E_{44}^{(2)}$ – вспомогательные состояния перед переходом в состояния исправное и существенно отказовое (для прохождения восстановления в штатном режиме); E_{55} – МСК в состоянии исправности СТС; E_{66} – состояние необнаруженного отказа после МСК; $E_{66}^{(1)}$, $E_{66}^{(2)}$ – вспомогательные состояния необнаруженного отказа перед переходом в состояние очередного МСК и в состояние поверки неисправной СТС, соответственно, E_{77} – состояние ложного отказа после МСК.

Граф модели СТС с МСК представлен на рисунке 1.

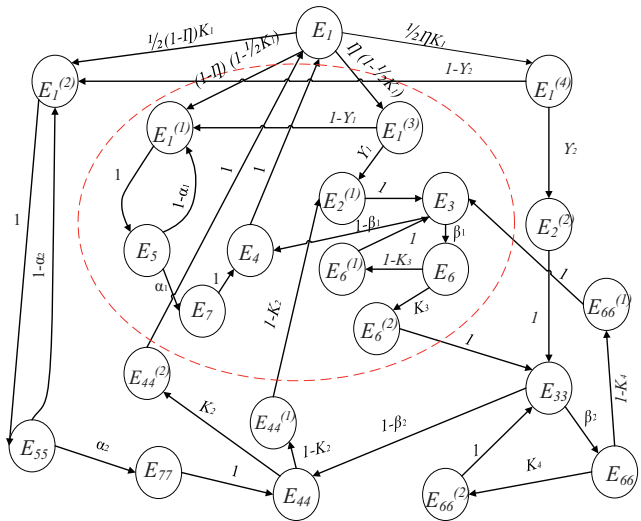


Рисунок 1 – Граф модели эксплуатации СТС с МСК

Внутри красной штрихпунктирной линии находятся состояния системы, входящие в контур поверки СТС, а вне красной штрихпунктирной линии – изображены состояния МСК.

Модель управления СТС с МСК представим структурно в виде алгебраической системы уравнений 23 порядка:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \pi_4 + \pi_{44}^{(2)}, \pi_1^{(1)} = 0,5(1-\eta)(1-k_1)\pi_1 + (1-\gamma_1)\pi_1^{(3)} + (1-\alpha_1)\pi_5, \\
 \pi_1^{(2)} &= 0,5(1-\eta)k_1\pi_1 + (1-\gamma_2)\pi_1^{(4)} + (1-\alpha_2)\pi_{55}, \pi_1^{(3)} = 0,5\eta(1-k_1)\pi_1, \\
 \pi_1^{(4)} &= 0,5\eta k_1\pi_1, \pi_2^{(1)} = \gamma_1\pi_1^{(3)}, \pi_2^{(2)} = \gamma_2\pi_1^{(4)}, \pi_3 = \pi_2^{(1)} + (1-k_3)\pi_6^{(1)} + \pi_{66}^{(1)}, \\
 \pi_4 &= (1-\beta_1)\pi_3 + \alpha_1\pi_5, \pi_5 = \pi_1^{(1)}, \pi_6 = \beta_1\pi_3, \pi_6^{(1)} = (1-k_3)\pi_6, \pi_6^{(2)} = k_3\pi_6, \\
 \pi_7 &= \alpha_1\pi_5, \pi_{33} = \pi_2^{(2)} + \pi_6^{(2)} + \pi_{66}^{(1)}, \pi_{44} = (1-\beta_2)\pi_{33} + \alpha_2\pi_{55}, \\
 \pi_{44}^{(1)} &= (1-k_2)\pi_{44}, \pi_{44}^{(2)} = k_2\pi_{44}, \pi_{55} = \pi_1^{(2)}, \\
 \pi_{66}^{(2)} &= \beta_2\pi_{33}, \pi_{66}^{(1)} = (1-k_4)\pi_{66}, \pi_{66}^{(2)} = k_4\pi_{66}, \pi_{77} = \alpha_2\pi_{55}.
 \end{aligned}$$

В приведенной системе уравнений: α_1 и α_2 – условные вероятности ложного отказа при поверке и МСК, соответственно; β_1 и β_2 – условные вероятности необнаруженного отказа при поверке и МСК, соответственно; γ_1 и γ_2 – вероятности отказов на интервале между двумя последовательными поверками и между двумя последовательными проведениями МСК, соответственно; k_1 – доля ИС, попадающая на МСК; k_2 – доля ИС полностью восстановленная после МСК; k_3 – доля ИС, попадающая из состояния необнаруженного отказа по-

сле поверки в состояние МСК; k_4 – доля ИС, попадающая из состояния необнаруженного отказа после МСК в состояние поверки; η – коэффициент, характеризующий долю переходов из состояния работоспособный в состояние неработоспособный или поверку (значение параметра η зависит от вида и функциональных особенностей ИС).

Отметим, что определитель системы уравнений равен нулю. Поэтому вместо одного из уравнений (например, вместо последнего) будем использовать условие нормировки:

$$\pi_1 + \sum_{s=1}^4 \pi_1^{(s)} + \pi_2^{(1)} + \pi_2^{(2)} + \sum_{i=3}^6 \pi_i + \pi_6^{(1)} + \pi_6^{(2)} + \pi_3 + \pi_4 + \pi_4^{(1)} + \pi_4^{(2)} + \pi_5 + \pi_6 + \pi_6^{(1)} + \pi_6^{(2)} = 1.$$

Тогда определитель системы уравнений становится отличным от нуля, и система уравнений будет иметь единственное решение. Решение системы уравнений осуществляется методом обратной матрицы.

Коэффициент готовности ИС с МСК к применению по назначению K_A вычисляется как отношение суммы произведений вероятностей нахождения в работоспособных состояниях на среднее время (математическое ожидание времени) нахождения в указанных состояниях к сумме произведений вероятностей нахождения во всех состояниях на среднее время (математическое ожидание времени) нахождения во всех состояниях.

Описание метрик бинарного классификатора

В настоящей работе предлагается в дополнение к традиционным показателям достоверности: вероятность ложного отказа α и вероятность необнаруженного отказа β использовать еще 4 показателя достоверности: правильность (accuracy), точность (precision), полнота (recall) и $F1$ -мера, которые широко применяются в теории искусственного интеллекта как метрики бинарного классификатора [5–7]. Указанные 4 показателя комплексно характеризуют текущее состояние парка СТС в части достоверности контроля технического состояния, функционирующего достаточно продолжительное время (в стационарном режиме).

Целью введения новых показателей (метрик) при моделировании метрологического обеспечения (МО) парка СТС является обеспечение оператора актуальной, полной и достоверной информа-

цией, отражающей не только результаты периодически проводимых поверок, но и информацию о текущем стационарном состоянии парка СТС в целом, которая характеризуется стационарными вероятностями нахождения образцов парка СТС в возможных технических состояниях [3].

Предлагаемые показатели достоверности являются функциями от вероятностей нахождения парка СТС в указанных технических состояниях. Они имеют интуитивно понятную интерпретацию, комплексно (разносторонне) характеризуют состояние парка и предназначены для принятия обоснованных решений.

Правильность представляет собой пропорцию верно предсказанных наблюдений: *правильность* = $(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)$, где

- TP (*true positive*, количество истинноположительных предсказаний). Это наблюдения, которые относятся к положительному классу (работоспособное) и были предсказаны классификатором корректно.

- TN (*true negative*, количество истинноотрицательных предсказаний). Это наблюдения, которые относятся к отрицательному классу (наличие отказа) и были предсказаны корректно.

- FP (*false positive*, количество ложноположительных предсказаний), также называемых ошибкой первого рода. Это наблюдения, которые были отнесены к неисправному классу, тогда как на практике относятся к исправному.

- FN (*false negative*, количество ложноотрицательных предсказаний) – также называемых ошибкой второго рода. Это наблюдения, кото-

рые были отнесены к работоспособному классу, тогда как на практике относятся к неработоспособному.

Удобство использования показателя правильности объясняется лаконичностью его значения: это отношение количества верно предсказанных наблюдений к общему количеству наблюдений.

Точность является долей наблюдений, отнесенных классификатором к положительным и являющихся истинно положительными: $\text{точность} = TP/(TP+FP)$.

Этот показатель может быть интерпретирован как измерение шума в предсказаниях классификатора – другими словами, он показывает, с какой вероятностью наши положительные предсказания являются правильными.

Отметим, что высокоточные модели являются «пессимистичными» и генерируют положительные прогнозы только при полной уверенности.

Полнота – это доля наблюдений, определяемых классификатором как положительные, от всех наблюдений истинно положительного класса:

$\text{полнота} = TP/(TP+FN)$. Этот показатель отражает способность модели определять наблюдения положительного класса. Модели с высоким показателем полноты являются «оптимистичными» и имеют низкую планку при генерации положительных предсказаний.

Отметим, что показатели точность и полнота проигрывают в интуитивности показателю правильности.

Также отметим, что если данные имеют несбалансированные классы (например, одному из классов принадлежит большая часть наблюдений, то возникает известный парадокс, когда модель обладает высокой правильностью при низкой точности предсказаний [4,5].

F1-мера – показатель, обеспечивающий некоторый баланс между точностью и полнотой (является средним гармоническим между точностью и полнотой): $F1\text{-мера} = 2 \cdot \text{точность} \cdot \text{полнота} / (\text{точность} + \text{полнота})$.

Этот показатель означает корректность полученных положительных предсказаний, он показывает какое количество классифицированных как положительные наблюдений являются истинно положительными.

Анализируя рассмотренные показатели в совокупности, отметим, что показатель правильности в наибольшей степени интуитивно понятен. Баланс между точностью и полнотой (компромисс между «оптимистичностью» и «пессимистичностью» модели) достигается в показателе F1-мера.

Применение метрик бинарного классификатора для оценки достоверности контроля состояния парка СТС

Для метрик бинарного классификатора вместо количества образцов СТС, находящихся в соответствующих технических состояниях, будем использовать вероятности нахождения в этих состояниях:

$$\text{правильность} = d_1 = (\pi_1 + \pi_2) / (\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 + \pi_{33} + \pi_{44} + \pi_{55} + \pi_{66}),$$

$$\text{точность} = d_2 = \pi_1 / (\pi_1 + \pi_7 + \pi_{77}), \text{ полнота} = d_3 = \pi_1 / (\pi_1 + \pi_6 + \pi_{66}),$$

$$F1\text{-мера} = d_4 = 2 \cdot \text{точность} \cdot \text{полнота} / (\text{точность} + \text{полнота}).$$

Результаты моделирования достоверности контроля технического состояния

Известно [8], что существуют оптимальные значения интервала между поверками (ИМП) T_K , выраженного в условных единицах измерений, и относительного допуска δ на контролируемый параметр, доставляющие максимальное значение коэффициента готовности K_A СТС к применению. На рисунках 2а,б) представлены соответствующие графики для экспоненциального закона распределения отказов с интенсивностью $\lambda = 0,0005$.

Зависимости показателей достоверности и коэффициента готовности от допуска на определяющий параметр при $\lambda = 0,0005$ представлены на рисунке 3.

Видно, что показатели достоверности незначительно убывают, а коэффициент готовности достигает максимума при $\delta = 0,1$, который в масштабе графика почти не заметен. Показатели d_1 и d_2 практически совпадают, поскольку вероятности отказа и необнаруженного отказа – достаточно малые величины.

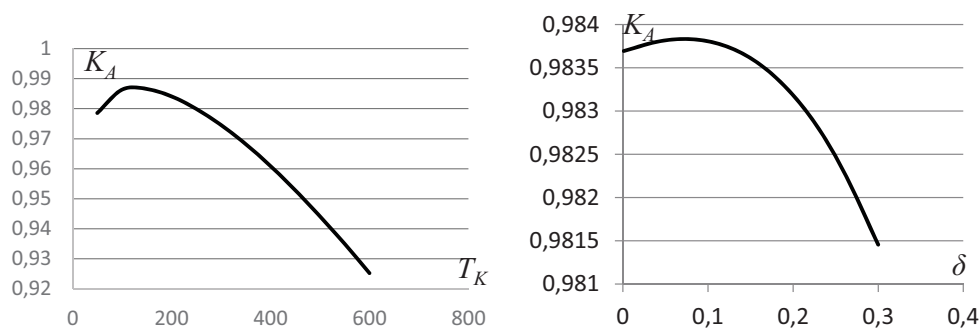


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента готовности при $\lambda = 0,0005$: а) от ИМП; б) от относительного допуска на контролируемый параметр

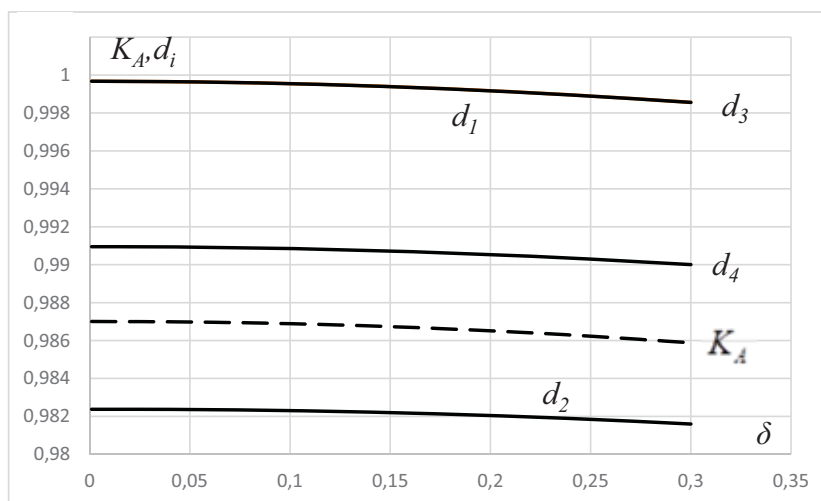


Рисунок 3 – Зависимости показателей достоверности и коэффициента готовности от допуска на определяющий параметр при $\lambda = 0,0005$

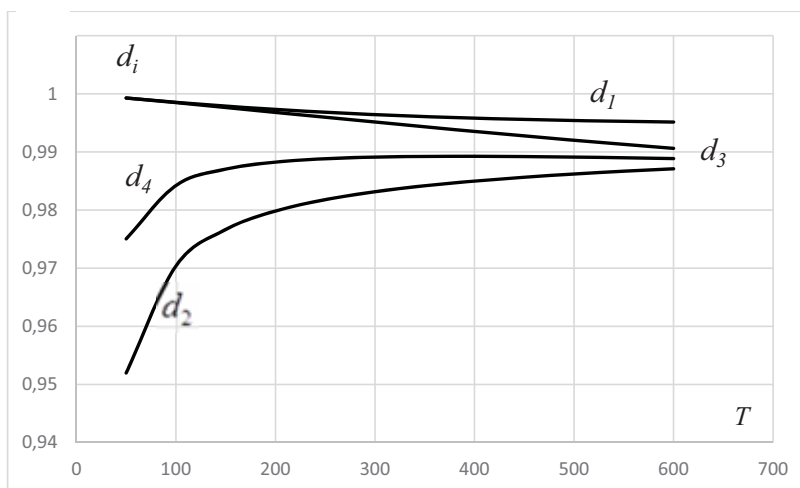


Рисунок 4 – Зависимости показателей достоверности от ИМП T при $\lambda = 0,0025$

Зависимости показателей достоверности от ИМП приведены на рисунке 4.

Отметим, что показатели правильности и полноты монотонно убывают, а показатель точности и *F1-мера* – возрастают. Коэффициент готовности убывает от 0,857 до 0,477.

На рисунках 3 и 4 моделируются внештатные ситуации, когда поверка осуществляется при различных (не оптимальных) значениях ИМП и допуска на контролируемый параметр.

Зависимости показателей достоверности от интенсивности отказов приведены на рисунке 5.

Видно, что все показатели монотонно убывают, при этом коэффициент готовности также монотонно убывает от 0,974 до 0,445, то есть увеличение интенсивности отказов приводит к ухудшению всех показателей достоверности.

Зависимости показателей достоверности от времени восстановления (ремонта) представлены на рисунке 6.

Отметим, что показатели правильности и полноты монотонно убывают, а показатель точности и *F-мера* – возрастают. При этом, коэффициент готовности убывает от 0,987 до 0,836.

На рисунках 5 и 6 моделируются внештатные ситуации, когда отказы происходят с большой интенсивностью и время восстановления (ремонта) достаточно велико.

Из представленных результатов моделирования можно сделать вывод, что наибольшее влияние на показатели достоверности и коэффициент готовности оказывают интенсивность отказов и периодичность поверки. Оператор, принимающий решение по дальнейшему управлению парком СТС

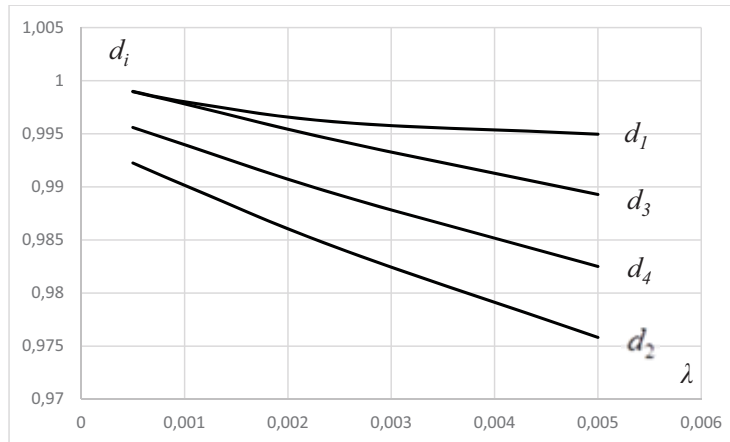


Рисунок 5 – Зависимости показателей достоверности от интенсивности отказов λ

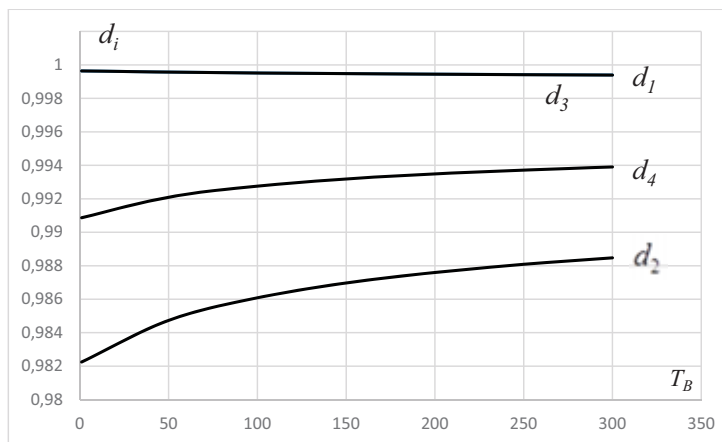


Рисунок 6 – Зависимости показателей достоверности от времени восстановления T_B

в части МО, может строить прогнозы с учетом темпов изменения указанных параметров.

Обсуждения

Полученные в работе результаты демонстрируют важную, но часто игнорируемую особенность эксплуатации СТС: наличие состояний, при которых система функционирует формально корректно, но выдает недостоверную информацию. В традиционных моделях надежности такие состояния либо не учитываются, либо агрегируются с отказами, что приводит к занижению оценки риска.

Особого внимания заслуживает влияние интенсивности отказов. Рост данного параметра приводит к ухудшению всех показателей достоверности, что подтверждает необходимость адаптивного управления периодичностью контроля. В противном случае система переходит в режим, при котором метрологический самоконтроль теряет свою эффективность.

Интересным результатом является также наблюдаемая близость значений отдельных метрик (в частности, ассигасу и recall) при малых вероятностях отказов. Это указывает на эффект несбалансированности классов, хорошо известный в машинном обучении, и подтверждает корректность использования аппарата бинарной классификации для анализа метрологических систем.

Таким образом, предложенный подход позволяет связать традиционные метрологические показатели с современными методами анализа данных и получить более полное представление о процессе функционирования измерительных систем.

Заключение

В работе разработана полумарковская модель функционирования сложных технических систем с метрологическим самоконтролем. Предложен подход к оценке достоверности контроля состояния, основанный на использовании метрик бинарного классификатора, адаптированных к вероятностной интерпретации состояний системы. Показано, что данные метрики позволяют комплексно оценивать эффективность метрологического самоконтроля и выявлять критические режимы эксплуатации. Проведенный анализ показал, что ключевыми факторами, определяющими уровень метрологической надежности, являются интенсивность отказов, периодичность диагно-

стирования и время восстановления. Установлено, что неоптимальный выбор указанных параметров может приводить к существенному увеличению времени пребывания системы в состоянии формирования недостоверной информации.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их использования для:

- разработки алгоритмов метрологического самоконтроля;
- обоснования периодичности диагностирования;
- повышения достоверности контроля состояния парка СТС;
- поддержки принятия решений при эксплуатации технических систем военного назначения.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку методов адаптивного управления параметрами метрологического самоконтроля и расширение модели с учетом неопределенности исходных данных и неполноты наблюдений.

Литература

1. ГОСТ Р 27.102–2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 8.734–2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.
3. Khayrullin R.Z., Ershov D.S., Malakhov A.V., Levina T.A. Mathematical Models of the Processes of Operation, Renewal and Degradation of a Fleet of Complex Technical Systems with Metrological Support // Axioms, 12(3):300, 2023.
4. Супрунюк В.В., Кувыкин Ю.А., Щедрин А.Ю., Горбачев А.А. О метрологическом самоконтроле измерительных систем // Вестник метролога. 2023. № 4. С. 5–9.
5. Хайруллин Р.З. Применение метрик бинарного классификатора для построения оценок достоверности контроля состояния парка сложных технических систем. Вестник астраханского государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, № 1–2026, стр. 7–14
6. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. М.: Изд-во Вильямс. 2006. 1390 с.
7. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: Изд-во ДМК. 2015. 400 с.
8. Сычев Е.В., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники. М.: Военное издательство. 1993. 400 с.

ПРОЦЕДУРА КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В СООТВЕТСТВИИ С МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ ТРЕБОВАНИЯМИ PROCEDURE OF THE CALIBRATION OF THE FACILITIES OF THE MEASUREMENTS IN ACCORDANCE WITH METROLOGICAL REQUIREMENTS

Храменков В.Н., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны,
Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Khramenkov V.N., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense, Nadeina O.V., c.p.s., FSBI «MSHC» of the
Ministry of Defense of the Russian Federation
E-mail: 32gnii@mil.ru; tel. +7(495) 586–23–88
ovnadeina@gmail.com; tel. 8(906)751–52–66

Аннотация. В статье рассматривается порядок установления метрологических требований к процедуре калибровки средств измерений, не относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений

Annotation. Order of the determination of the metrological requirements is considered in article to procedure of the calibration of the facilities of the measurements, not referring to sphere of the government regulation of the provision unity measurements.

Ключевые слова: средства измерений, калибровка, сфера государственного регулирования, поверка, аттестованные методики.

Keywords: the facilities of the measurements, calibration, sphere of the government regulation, check, qualified methods.

Стратегия обеспечения единства измерений в Российской Федерации (РФ) – документ стратегического планирования, содержащий систему долгосрочных приоритетов, целей и задач развития системы обеспечения единства измерений (далее – система ОЕИ), направленных на обеспечение устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития и обеспечения национальной обороны и безопасности Российской Федерации путем применения точных, объективных и достоверных результатов измерений в различных отраслях экономики и государственного управления.

В федеральном законе РФ «Об обеспечении единства измерений» [1] выделены государством две сферы области деятельности в обеспечении единства измерений: сферу государственного регулирования, в которой оно принимает на себя ответственность за обеспечение единства измерений (ОЕИ) и осуществляет непосредственное регулирование – это сфера государственного регулирования ОЕИ, в остальных областях государство только создает необходимые условия для самостоятельной деятельности субъектов по обеспечению единства измерений. Таким образом, законодательство в области ОЕИ условно разделяется на две большие части: сферу государственного регулирования ОЕИ и добровольную сферу в области регулирования ОЕИ.

Основы ОЕИ в сфере государственного регулирования изложены в [1], где установлено, что все измерения, выполняемые в данной сфере, должны проводиться по аттестованным методикам с помощью средств измерений (СИ) утвержденного типа, прошедших поверку. Это задает основные формы государственного регулирования ОЕИ, к которым относятся поверка СИ, утверждение типа СИ, аттестация методик измерений. Об утверждении типа СИ упоминается более чем в 2500 документов, около 700 нормативных правовых актов затрагивают вопросы, связанные с поверкой СИ. Общее число таких документов превышает 4500.

Кроме того, к документам, описывающим систему ОЕИ, относятся технические регламенты (более 60), технические регламенты Таможенного союза (более 30), межгосударственные документы ГОСТ, Правила, Рекомендации и национальные стандарты в области ОЕИ.

К международным документам, регламентирующим деятельность в области ОЕИ, подписанным и признаваемым Российской Федерацией, относятся Метрическая Конвенция 1875 года, разделы договора о Союзном государстве – статьи 17 и 29) и о Евразийском экономическом союзе (статья 51) ЕАЭС.

Важным для развития системы ОЕИ является договоренность о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и

измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами [2]. Россия является полноправным членом международных метрологических организаций – Международной организации законодательной метрологии и Межправительственной организации Метрической Конвенции.

В рамках регионального сотрудничества особое место занимают страны Содружества Независимых Государств (СНГ) и Евразийского экономического союза (ЕАЭС). При этом к системной проблеме ОЕИ в вопросах интеграции в международную систему метрологии относится отсутствие нормативного решения по рациональному объединению концептуально различных систем измерений, традиционной для стран СНГ, опирающейся на поверочные схемы, и зарубежной, опирающейся на калибровочные иерархии, в которых отсутствует обязательная необходимость учета долговременной нестабильности СИ.

Подписанное 29 мая 2015г. в г. Бурабай (Казахстан) межправительственное Соглашение о взаимном признании результатов испытаний СИ с целью утверждения типа, метрологической аттестации, поверки и калибровки СИ основывается на порядке признания результатов, принимаемым межгосударственным стандартом (МГС) по стандартизации, метрологии и сертификации. Необходимо, чтобы документы СНГ не расходились методически с документами ЕАЭС.

Государства-члены ЕАЭС проводят согласованную политику в области ОЕИ в соответствии с пунктом 4, статьи 51, Раздела X Договора о Евразийском экономическом союзе от 29 мая 2014 г. посредством гармонизации законодательства государств-членов ЕАЭС в области ОЕИ и проведения согласованных действий в области ОЕИ. Согласно пункту 9 Протокола в Приложении № 10 к Договору о Евразийском экономическом союзе от 29 мая 2014 г. Евразийская экономическая комиссия (ЕЭК) утвердила 10 документов, регламентирующих взаимное признание результатов работ, проведение работ, а также порядок взаимного предоставления сведений в области ОЕИ.

При этом для правильной организации развития системы ОЕИ и метрологической инфраструктуры было необходимо прогнозировать потребности государства и общества в измерениях. Мониторинг и анализ развития приоритетных областей экономики, здравоохранения, оборо-

ны и безопасности государства должны также формировать информацию об объектах и видах измерений, о требуемых точностных характеристиках измерений. Разработка таких прогнозов и программ – сложная задача, требующая соответствующего ресурсного обеспечения.

В настоящее время отсутствуют механизм и методология исследования и прогнозирования потребностей государства и общества в измерениях. Важная системная проблема связана с отсутствием методов оценки влияния ОЕИ на экономику страны и в целом на качество жизни. Экономически развитые страны вкладывают существенные средства в развитие метрологической инфраструктуры. По экспертным оценкам экономическая значимость измерений составляет от 0,8 до 6,0 % ВВП, наблюдается устойчивая корреляция между рейтингом «качества жизни» и инвестициями в инфраструктуру измерений.

Среди основных механизмов влияния метрологии на экономику и качество жизни отмечаются воздействие в сфере торговли, промышленности, внедрение инновационных технологий, здравоохранения и экологии [2]. В условиях реализации прогноза социально-экономического развития Российской Федерации по инновационному сценарию количество измерений в стране будет возрастать, а общество будет предъявлять все более высокие требования к достоверности и сопоставимости результатов измерений, и, прежде всего, в областях, связанных с повышением качества жизни, развитием новых технологий, а также обороны и безопасности государства.

Приведенные выше приоритеты с учетом позиционирования системы ОЕИ как инфраструктурной обеспечивающей системы, требуют введения ряда показателей, характеризующих степень удовлетворенности граждан и хозяйствующих субъектов состоянием системы ОЕИ Российской Федерации.

Целевые показатели развития системы ОЕИ разделены на четыре группы. К **первой группе** относятся показатели, характеризующие степень удовлетворенности граждан, общества и государства состоянием ОЕИ.

Показатель, характеризующий обеспеченность измерений в сфере государственного регулирования эталонами, методиками измерений и стандартными образцами, является первым и выражается в процентах от количества, обеспечивающего уровень качества измерений.

Ряд опросов хозяйствующих субъектов показал, что имеется существенная потребность в снижении стоимости оказания услуг по ОЕИ и сокращения времени, затрачиваемого на их получение. Для отражения данной потребности были введены два следующих показателя:

- снижение средней стоимости государственной услуги в области ОЕИ (с учетом инфляции);
- снижение среднего времени оказания государственной услуги в области ОЕИ.

Важной характеристикой удовлетворенности граждан и хозяйствующих субъектов является доступность государственных услуг в области ОЕИ как гражданам Российской Федерации, так и хозяйствующим субъектам. Она может быть охарактеризована как доля услуг, получаемых с помощью удаленного доступа, в том числе по сети Интернет.

Доступность информации в области ОЕИ гражданам Российской Федерации и хозяйствующим субъектам может быть охарактеризована как процент информации, находящейся в открытом доступе, от всей информации по ОЕИ в Федеральном информационном фонде ОЕИ.

С учетом приоритетов регионального развития Российской Федерации требуется вводить показатель, характеризующий повышение обеспеченности метрологическими услугами промышленных предприятий в Сибирском и Дальневосточном регионах как снижение времени оказания услуги для субъектов этих регионов.

Вторую группу показателей образуют показатели, характеризующие уровень развития собственно системы ОЕИ. К ним относятся:

- количество усовершенствованных и вновь созданных государственных первичных эталонов;
- количество эталонов, разрабатываемых государственными научными метрологическими институтами (ГНИИ), для передачи государственным региональным центрам метрологии (ГРЦМ);
- количество записей о калибровочных и измерительных возможностях Российской Федерации, зарегистрированных в Международном бюро мер и весов (МБМВ);
- количество разработанных и утвержденных первичных референтных методик измерений;
- количество типов стандартных образцов, зарегистрированных в Реестре ГССО;
- отношение объемов калибровочных и поверочных работ;

– точность согласования национальной шкалы времени UTC(SU) с международной шкалой времени UTC;

- количество стандартных справочных данных.

К **третьей группе** относятся показатели, характеризующие уровень импортозамещения в области ОЕИ. Импортозамещение по эталонам характеризует *доля эталонов отечественного производства*. Импортозамещение по СИ характеризует *доля утвержденных типов СИ отечественного производства*. Импортозамещение по СО характеризует *доля СО утвержденного типа отечественного производства*.

К **четвертой группе** относятся показатели, характеризующие уровень развития ОЕИ в СОБ государства. К ним относятся:

- доля современной измерительной техники;
- уровень автономности;
- доля специалистов – метрологов, проходящих ежегодно подготовку (переподготовку) повышения квалификации.

В связи с существующей неопределенностью развития мировой экономики значения показателей развития системы ОЕИ должны регулярно пересматриваться в соответствии с действующим законодательством в зависимости от конкретного сценария развития экономики, а также в зависимости от уровня фактически достигнутых значений показателей.

Калибровка СИ может осуществляться для проведения измерений при создании и эксплуатации образцов вне сферы (когда нет обязательных требований).

В соответствии с Федеральным законом от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [1] под калибровкой средств измерений понимается совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений (СИ). При этом под метрологической характеристикой СИ понимается характеристика одного из свойств СИ, влияющая на результат измерения [3]. Калибровка СИ возможна (даже необходима) при разработке, производстве и эксплуатации в случае, если к измерениям его параметров не предъявляются обязательные метрологические требования и, следовательно, данные измерения не относятся к СГР ОЕИ. Вместе с тем, если в необходимых случаях потребуется проводить измерения

на образце вне СГР (например, при поиске отказавшего блока, исследованиях и т.д.), могут применяться средства измерений неутвержденного типа, но с известными показателями точности, которые должны подтверждаться их калибровкой.

Согласно [1] в отличие от утверждения типа СИ и его поверки, которые являются формами государственного регулирования в области ОЕИ, вне сферы государственного регулирования ОЕИ таких требований к СИ не предъявляется. Более того, согласно п. 7 ст. 13 №102-ФЗ «средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования ОЕИ, могут подвергаться поверке в добровольном порядке».

Предлагаемая в [1] добровольная процедура поверки СИ не всегда может быть реализована, поскольку вне сферы государственного регулирования ОЕИ не предусмотрена процедура утверждения типа СИ, в ходе которой согласно п. 1 ст. 12 закона должна в том числе устанавливаться методика поверки и обеспечиваться совместимость (техническая, метрологическая и др.) СИ со средствами поверки.

Кроме того, согласно ст. 18 [1] «СИ, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования ОЕИ, могут в добровольном порядке подвергаться калибровке». Данное положение №102-ФЗ противоречит фундаментальному свойству обеспечения единства измерений – прослеживаемости, как свойства эталона единицы величины, средства измерений или результата измерений, заключающегося в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном или национальным первичным эталоном иностранного государства соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин. поверки, калибровки средств измерений. Более того, согласно (Метрология. Основные термины и определения) Система технического регулирования включает две подсистемы:

- подсистему 1 по заданию обязательных метрологических требований (ОМТ) к измерениям и средствам измерений параметров оборонной продукции (ОП) и связанных с ней процессов;
- подсистему 2 по реализации этих требований при обосновании и установлении измерений и обеспечения их метрологического качества.

Под процессами в соответствии с законодательством РФ о техническом регулировании понима-

ются проектирование, производство, испытания, эксплуатация и другие виды деятельности на стадиях жизненного цикла оборонной продукции, которая включает вооружение и военную технику, их составные части, электронную компонентную базу, вещества, материалы и другие виды продукции военного назначения.

Обязательные метрологические требования – метрологические требования, установленные нормативными правовыми актами РФ и обязательные для соблюдения на территории РФ. Метрологические требования – требования к влияющим на результат и показатели точности измерений характеристикам (параметрам) измерений, эталонов единиц величин, стандартных образцов, средств измерений, а также к условиям, при которых эти характеристики (параметры) должны быть обеспечены.

Сфера государственного регулирования ОЕИ распространяется на измерения, к которым в целях, предусмотренных частью 1 статьи 1 ФЗ-102 установлены обязательные метрологические требования и которые выполняются при осуществлении деятельности в области обороны и безопасности государства.

Ст. 5. Требования к измерениям.

Измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования ОЕИ, должны выполняться по аттестованным методикам измерений (первичным референтным, референтным и другим методикам), за исключением методик прямых измерений, с применением средств измерений утвержденного типа прошедших поверку ст. 5 [1] требования.

Как отмечается в Стратегии до 2025 г., существующая в настоящее время нормативно-правовая база обеспечения единства измерений не в полной мере отвечает требованиям инновационной экономики.

Литература

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»
2. РД РСК 01- 2014. «Положение о Российской системе калибровке».
3. РМГ 120–2013. «Рекомендации по межгосударственной стандартизации ГСИ. Общие требования к выполнению калибровочных работ».
4. ГОСТ Р 8.879–2014. «ГСИ. Методики калибровки СИ. Общие требования к выполнению калибровочных работ».
5. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. «Межгосударственный стандарт. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных работ».

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ НОМЕНКЛАТУРЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE RANGE OF MEASURING INSTRUMENTS USED FOR METROLOGICAL MAINTENANCE OF SPECIAL EQUIPMENT PRODUCTS

Корнев А.С., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Малахов А.В., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Московский политехнический университет,
Фуфаева О.В., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Kornev A.S., candidate of technical sciences, Federal State Budget Institution «Main Scientific Metrological Center»
of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
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
Fufaeva O. V., Federal State Budget Institution «Main Scientific Metrological Center» of the Ministry
of Defense of the Russian Federation
lexxkorban@yandex.ru, +7 (926) 866-23-36
sanya-mall@yandex.ru, +7 (919) 722-12-02
fufaeva_ov@mail.ru, +7 (915) 357-88-38

Аннотация. Рассматривается методический подход, основанный на использовании данных о производственных возможностях поверочных организаций и сведений об интервалах между поверками средств измерений, которые позволяют получить оценку номенклатуры и количества средств измерений, применяемых в анализируемой области для метрологического обеспечения эксплуатации изделий специальной техники.

Annotation. A methodological approach is considered based on the use of data on the production capabilities of verification organizations and information on the inter-verification intervals of measuring instruments, which make it possible to obtain an estimate of the range and number of measuring instruments used in the analyzed area for metrological support of the operation of special equipment products.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, средство измерений, интервал между поверками, поверочная организация.

Key words: metrological support, measuring instruments, inter-verification interval, verification organizations.

В соответствии с [1] формирование перспективных планов по метрологическому обеспечению (МЛО) изделий специальной техники требует исчерпывающей информации для формирования требований к производственным возможностям поверочных организаций, получить которую не всегда представляется возможным. С целью устранения выявленного противоречия предлагается использовать сведения, имеющиеся в архиве системы аккредитации и лицензирования, о количестве рабочих эталонов (РЭ), применяемых в поверочных организациях, в методическом аппарате при анализе номенклатуры средств измерений (СИ), применяемых для МЛО эксплуатации образцов специальной техники.

Для определения соотношения количества СИ различных типов ($y_1 : y_2 : \dots : y_l$) в соответствии с [2] в первом приближении достаточно вычислить соотношение количества поверочных организаций, поверяющих СИ данных типов. Тогда, используя данные об общем количестве поверяемых СИ (с детализацией до вида измерений), их интервалах между поверками и соотношении количества СИ

различных типов, возможно оценить номенклатуру и количество СИ каждого типа, применяемых для МЛО эксплуатации образцов специальной техники. При этом точные данные о количестве отдельных РЭ, применяемых только в поверочных организациях, имеющиеся в архиве системы аккредитации лицензирования, могут быть использованы для контроля достоверности полученных оценок.

Ограничимся номенклатурой, общим количеством поверяемых СИ в объединении. С помощью соотношения ($y_1 : y_2 : \dots : y_l$) попробуем оценить номенклатуру, количество СИ каждого типа для МЛО специальной техники.

Таким образом, общий подход к оценке номенклатуры, количества СИ по данным архива системы аккредитации и лицензирования, реализующий предложенный подход, в соответствии с [2, 3] целесообразно представить в виде расчетной формулы и критерия точности оценки:

$$\begin{aligned} N_i &= N \cdot \tau_i \cdot y_i, \\ \Delta &= N_i - N_{i(p)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где N_i – оценка количества СИ i -го типа, применяемых для МЛО эксплуатации образцов специальной техники; N – общее количество СИ (с детализацией до вида измерений), поверяемых всеми поверочными организациями; τ_i – интервал между поверками СИ i -го типа; Y_i – доля СИ i -го типа в общем количестве СИ, применяемых для МЛО эксплуатации образцов специальной техники; $N_{i(p)}$ – общее количество РЭ единиц величины i -го типа в поверочных организациях; Δ – критерий точности оценки.

Предварительный анализ предложенного метода по методологии [4–6] показал, что результаты оценки номенклатуры, количества СИ, его применение только на основе (1) может привести к появлению существенных ошибок, так как максимальное отношение количества СИ двух разных типов, рассчитанное предложенным способом, не превышает числа поверочных организаций, данные о которых были использованы для расчета. В настоящее время архив аккредитации и лицензирования содержит информацию о сотнях поверочных организаций, тогда как количество СИ разных типов в исследуемой области может колебаться от единиц до десятков тысяч. Это противоречие может быть разрешено, если при подсчете количества поверочных организаций, поверяющих определенный тип СИ, придать больший «вес» поверочным организациям с большими производственными возможностями и узкой номенклатурой поверяемых СИ, применяемых для МЛО эксплуатации образцов (комплексов) специальной техники. При этом процедура изменения «весов» поверочных организаций может быть рекуррентной.

Тогда значения удельных коэффициентов, определяющих «вес» поверочной организации после r -ой итерации, находят по формуле:

$$y_i^{(r)} = \sum_{j \in \{J_{ix}\}} \frac{d_{ij} V_{jk} y_i^{(r-1)}}{N_k \sum_{i \in \{I_k\}} y_i^{(r-1)} d_{ij}}, \quad k = \overline{1, K}, \quad i \in \{I_k\}, \quad (2)$$

где d_{ij} – исключаяющий коэффициент ($d_{ij}=1$, если j -ая поверочных организаций поверяет СИ i -го типа, в противном случае $d_{ij}=0$); V_{jk} – годовые производственные возможности j -ой поверочных организаций по поверке СИ k -го вида измерений, применяемых для МЛО эксплуатации образцов специальной техники; $y_i^{(r-1)}$ – значение удельного коэффициента на предыдущем шаге итерации.

По данным архива об оснащенности поверочных организаций РЭ можно рассчитать количество РЭ i -го типа (N_i^{p3}):

$$N_i^{p3} = \sum_{j \in \{J^g\}} N_{ij}^{p3}, \quad i \in \{I^{p3}\}, \quad (3)$$

где N_{ij}^{p3} – количество РЭ i -го типа в j -ой поверочных организаций; $\{J^g\}$ – множество поверочных организаций, оснащенных РЭ i -го типа; $\{I^{p3}\}$ – множество типов РЭ, которые эксплуатируются только в поверочных организациях уровня баз измерительной техники и выше.

Для i -го РЭ определяется критерий оценки точности расчетов $\partial_i^{(r)}$:

$$\partial_i^{(r)} = \frac{|N_i^{p3} - N_i^{(r)}|}{N_i^{p3}}, \quad i \in \{I^{p3}\}, \quad (4)$$

где $N_i^{(r)}$ – оценка количества РЭ i -го типа после r -ой итерации, рассчитанная по формуле (3), N_i^{p3} – количество типов РЭ, выбранных для проверки; $\partial_i^{(r)}$ – критерий оценки точности расчетов для i -го РЭ.

Решение о прекращении итераций принимается, когда значение выражения (4) достигает заданного значения точности.

Общее количество поверяемых СИ (с детализацией до вида измерений) можно рассчитать с точностью данных архива по годовой производительности поверочных организаций. Сложность решения данной задачи заключается в отсутствии полной информации о производительности поверочных организаций (не все поверочные организации прошли первичную аккредитацию). Тем не менее информации, содержащейся в архиве аккредитации и лицензирования, достаточно для прогнозирования производительности поверочных организаций, не прошедших первичную аккредитацию. Основанием для этого являются сведения по аккредитации всех видов поверочных организаций в исследуемой области. Для получения оценки производственных возможностей неаккредитованных поверочных организаций необходимо построить аппроксимирующую кривую изменения во времени средней производительности аккредитованных поверочных организаций. Интерполяция данной кривой позволяет получить оценку производительности поверочных организаций, не прошедших первичную аккредитацию.

Результаты интерполяции в соответствии с [7, 8] представлены на рисунке 1. Погрешность оценки общего количества СИ в исследуемой области при сравнении расчетных значений с фактическими значениями, представленными в отчетах о МЛО поверочными организациями, не превышает 20...25%.

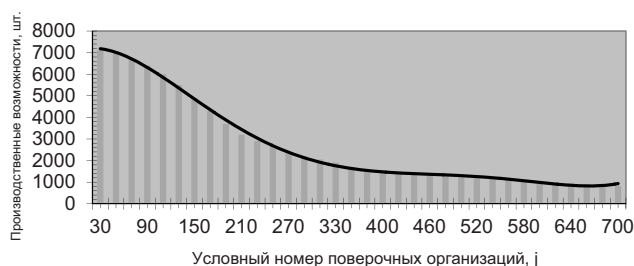


Рисунок 1 – Производительность поверочных организаций

Одновременно следует учитывать большую трудоемкость по преобразованию данных архива системы аккредитации и лицензирования в электронную форму. База данных типов СИ радиотехнических и радиоэлектронных величин характеризуется более чем 2500 записями, СИ электрических и магнитных величин содержит более 12000 записей. Поэтому для предварительной проверки расчетов были использованы данные лишь о 64 поверочных организаций.

Результаты экспериментальных исследований следующие:

первоначальной точности оценок с использованием рекуррентного метода расчета удельных коэффициентов в целом достаточно для прогнозирования номенклатуры и количества СИ, применяемых в анализируемой области для МЛО изделий специальной техники;

одной из возможных причин полученной точности расчетных оценок является недостоверность данных архива;

при увеличении количества исходных данных точность расчетных оценок увеличивается;

погрешность расчетных оценок обратно пропорциональна степени их детализации (рисунок 2).

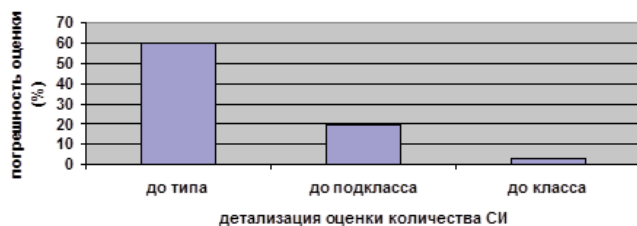


Рисунок 2 – Зависимость точности расчетной оценки от степени ее детализации

Таким образом, разработанный метод целесообразно использовать при создании методики оценки номенклатуры, количества, применяемых для МЛО эксплуатации образцов (комплексов) специальной

техники. Достаточная точность оценки количества СИ до типа позволяет быстро оценить достоверность представленных данных для принятия решения в условиях ограниченного времени.

Анализ результатов проведенных исследований показал сильную зависимость точности оценок от объема исходных данных. Следует ожидать, что по мере накопления массива данных по аккредитации поверочных организаций точность полученных оценок будет возрастать.

Таким образом, установлено, что предлагаемый методический подход может быть использован при создании методики оценки номенклатуры, количества, применяемых для МЛО эксплуатации образцов специальной техники. Для повышения точности расчетных оценок и уточнения алгоритма расчета необходимо проведение дальнейших исследований и дальнейшее наполнение системы аккредитации и лицензирования. Одновременно данный методический аппарат может быть использован для проверки достоверности представленных данных об аккредитованных поверочных организациях в исследуемой предметной области.

Литература

- Буренок В.М., Ляпунов В.М., Мудров В.И. Теория и практика планирования и управления развитием вооружения. Монография. – Москва: Вооружение. Политика. Конверсия, 2005. 418 с.
- Ершов Д.С., Хайруллин Р.З. Моделирование метрологических систем. – М.: Московский Политех, 2024. 206 с.
- Ершов Д.С., Малахов А.В., Талалай А.В., Хайруллин Р.З. Анализ моделей эксплуатации сложных технических систем // Измерительная техника, 2023, № 7. С. 15–23.
- Хайруллин Р.З. Полумарковская модель эксплуатации и обновления парка измерительной техники // Вестник метролога. 2023. № 1. С. 11–17.
- Мищенко В.И., Кравцов А.Н., Мамлеев Т.Ф. Полумарковская модель функционирования резервированных средств измерений с учетом периодичности поверки // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 22–27.
- Хайруллин Р.З., Никитина И.А. Исследование полумарковских моделей эксплуатации специальной техники // Динамика сложных систем – XXI век, 2019, т. 13, № 1. С. 5–12.
- Khayrullin R.Z. Targeted management of performance indicators of the park of control and measuring equipment used in the construction and housing and public utilities sectors. RSP2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 661 012126.
- Хайруллин Р.З. К оптимальному управлению показателями эффективности парка измерительной техники // Вестник МГСУ, 2017, № 5. С.564–571.

**ДОСТИЖЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОЙ, ОПТИЧЕСКОЙ
И ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ (ФОТОНИКА – 2026)
ACHIEVEMENTS OF THE DEVELOPMENT TO BRANCHES IN THE FIELD OF LAZER, OPTICAL AND
ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ TECHNOLOGY ENTERPRISE TO RUSSIA (FOTONIKA – 2026)**

*Шпилевский О.Б., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Руденкова Е. Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Shpilevskiy O.B., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation,
Nadeina O.V., c.p.s., FSBI «MSHC» 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, e-mail: ovnadeina@gmail.com, tel. +79999989015.*

31 марта 2026 года открылась 20-я международная специализированная выставка лазерной, оптической и оптоэлектронной техники «**Фотоника. Мир лазеров и оптики**», которая проводится ежегодно с 2006 года.

Организаторами выставки выступают АО «ЭКСПОЦЕНТР» и Лазерная ассоциация. За два десятилетия непрерывного развития выставка стала главной коммуникационной площадкой лазерно-оптической отрасли России, получила признание российского и международного сообщества профессионалов фотоники:

- 236 экспонентов из 5 стран: Армения, Индия, Китай, Республика Беларусь, Россия;
- 11 060 посетителей из 24 стран и 72 регионов.

Сегодня «Фотоника» – не просто единственная лазерно-оптическая выставка в России, это – знаковое событие для отраслевого сообщества, где именитые отечественные и мировые бренды вместе с молодыми компаниями представляют потребителям, занятым в различных областях экономики, новейшие образцы лазерного оборудования, оптических изделий, компонентов и материалов.

В выставке приняли участие более 160 компаний, среди которых 105 – российские. Ключевые российские участники: Госкорпорация «Росатом», ФГУП «ВНИИФТРИ» Холдинг «Швабе», «Лазерный центр», АО «ЛЛС», ООО «Лазерформ», «Азимут Фотоникс», ОКБ «Булат», МФТИ, ФГБУ «ВНИИОФИ», МГТУ им. Н.Э. Баумана, НПФ «Уран», ООО «Авеста».

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ») Росстандарта [2] модернизирует ключевые государственные первичные эталоны в соответствии с переопреде-

лением единиц на 26-й Генеральной конференции по мерам и весам.

В преддверии Дня науки Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) утвердило 7 Государственных первичных эталонов с новыми характеристиками, модернизированных в 2025 году во ФГУП «ВНИИФТРИ». Усовершенствованные эталоны относятся к таким областям измерений, как физико-химические, электромагнитные, температурные и радиотехнические измерения. Часть новых государственных поверочных схем с новыми измерительными возможностями эталонов вступили в действие с 10 февраля 2026 года.

«Непрерывная работа Росстандарта по совершенствованию эталонной базы позволяет повышать точность эталонов, а также расширять их метрологические возможности. Это особенно важно на фоне постоянного роста требований к точности измерений и появления инновационных методов в сферах, где малейшие погрешности могут оказывать существенное влияние на развитие инноваций и оптимизацию технологических процессов в ведущих секторах экономики. Таким образом, это позволяет сохранять не только конкурентоспособность, но и задавать новые ориентиры для всей отрасли», – отметил руководитель Росстандарта Антон Шалаев.

Одними из ключевых результатов модернизации эталонов стали уникальные характеристики Государственного первичного эталона единицы температуры – Кельвина в диапазоне от 0,3 до 273,16 К (ГЭТ 35–2026) и Государственного первичного эталона показателей рХ активности ионов и массовой (атомной) доли дейтерия в жидкости (ГЭТ 171–2026) [1].

В ходе модернизации в состав ГЭТ 35 включена аппаратура шумовой термометрии, что позволило воспроизводить единицу температуры во всем температурном диапазоне эталона первичными методами в соответствии с действующим определением единицы температуры Кельвина, основанном на фиксированном значении постоянной Больцмана, которое было принято на 26-м заседании Генеральной конференции по мерам и весам. Ранее для воспроизведения единицы температуры в диапазоне от 0,3 до 4,2 К использовался только метод контактной термометрии.

Измерения в области сверхнизких температур важны для обеспечения работы квантовых компьютеров при проведении космических исследований, охлаждении ракетного топлива, транспортировке газа, а также в медицине.

ГЭТ 35 регулярно участвует в международных сличениях, демонстрируя свои измерительные возможности на уровне ведущих зарубежных метрологических институтов. Проведение регулярных сличений между лабораториями позволяет подтверждать высокие показатели точности эталона, а также интегрировать российскую эталонную базу в международную систему и обеспечивать взаимное признание эталонов.

Государственный первичный эталон показателей рХ активности ионов и массовой (атомной) доли дейтерия в жидкости (ГЭТ 171–2026) позволяет воспроизводить, хранить и передавать показатель активности ионов дейтерия в жидкости в диапазоне шкалы рD от 1,2 до 7,0, единицы массовой доли дейтерия в жидкости в диапазоне от 0,016 до 49,9 % и единицы атомной доли дейтерия в диапазоне от 0,014 до 47,3 %. Модернизация эталона позволила расширить диапазон измерений для определения рD активности ионов дейтерия и атомной молярной доли дейтерия в жидкости. Это позволит разработать стандартные образцы (СО) отечественного производства и повысить технологический суверенитет России в этой области измерений.

«Усовершенствование данного эталона позволяет обеспечить единство измерений в критически важных отраслях российской промышленности, в первую очередь, в технологиях атомной энергетики; ядерного топливного цикла на основе тяжеловодных реакторов; безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом, где определение водородного

показателя в тяжелой воде очень важно. Также ГЭТ 171–2026 востребован в биомедицине и ветеринарии, где ведутся исследования биологических процессов с использованием методов изотопных меток, в технологиях новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику», – отметил заместитель начальника научно-исследовательского отделения физико-химических и электрических измерений по научной работе – учёный-хранитель государственного эталона Сергей Прокунин.

По результатам совершенствования эталона во ФГУП «ВНИИФТРИ» будут разрабатываться и производиться СО на основе тяжелой воды с повышенным содержанием дейтерия в различном диапазоне концентраций для метрологического обеспечения предприятий и атомных станций, использующих тяжеловодные реакторы. В дальнейшем планируется создание рабочих эталонов активности ионов дейтерия для метрологического обеспечения диапазона рD от 1 до 7, что является особенно востребованным в биомедицинской и ядерной отраслях.

Также накануне Дня российской науки генеральный директор Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений» Сергей Донченко и ректор «Национального исследовательского университета «Московского института электронной техники» (МИЭТ) Сергей Гаврилов подписали соглашение о сотрудничестве [2].



Соглашение охватывает тесное взаимодействие и сотрудничество двух ведущих институтов по самому широкому кругу вопросов и направлено на объединение усилий в научно-исследовательской

деятельности, развитии квалифицированного кадрового потенциала в сфере метрологии, целевой подготовке и повышении квалификации специалистов. Приятно видеть, каких высоких результатов достигает сегодня МИЭТ. Институт не только воспитывает талантливую молодёжь и готовит востребованных инженеров, но и сам является мощным центром разработки и создания современной электроники, что для нас имеет ключевое значение. Уверен, что интеграция наших возможностей (уникальной измерительной базы ВНИИФТРИ и научно-технологического потенциала МИЭТа) позволит объединить усилия для новых достижений на благо государства», – отметил генеральный директор ФГУП «ВНИИФТРИ» Сергей Донченко.

«Наши взаимоотношения основаны не только на географической близости, но и на глубокой кадровой преемственности. Для нас большая гордость, что во ФГУП «ВНИИФТРИ» успешно трудятся выпускники университета, а ведущие специалисты Вашего научно-исследовательского института делятся своим уникальным опытом со студентами МИЭТа. Знаменательные юбилеи, которые мы отметили в прошлом году – 70 лет ФГУП «ВНИИФТРИ» и 60 лет МИЭТу, – это не просто вехи в истории. Это точка отсчёта для вывода нашего партнёрства на качественно новый, стратегический уровень. Мы рассматриваем ВНИИФТРИ как надёжного партнёра в научно-исследовательской деятельности, а также как потенциального заказчика для разработки передовых технологий», – подчеркнул в своей речи ректор МИЭТ Сергей Гаврилов [3].

В рамках сотрудничества планируется осуществление совместных научно-исследовательских и других программ и проектов, привлечение к работе ученых, специалистов и экспертов обоих институтов, проведение общих конференций, семинаров, «круглых столов» и других научно-образовательных мероприятий. Также планируется проведение совместной научно-исследовательской деятельности, обмен информацией, литературой, базами данных, совместная подготовка и выпуск научных монографий, статей и сборников, учебных и учебно-методических изданий, организация мероприятий по повышению квалификации научных работников.

Подписание Соглашения и его реализация знаменует собой существенный этап в развитии сотрудничества в области науки и технологий, направленный на оптимизацию связей между

академическими исследованиями, прикладными разработками и производственным сектором. Партнёрство одного из крупнейших национальных метрологических институтов и ведущего отраслевого вуза будет способствовать эффективному решению поставленных государством задач.

Впервые в выставке приняли участие компании «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», «Азмерит», «Акметрон», «Системы фотоники», «Элмак».

На площади 7 000 кв. м представлены лазерные технологии обработки материалов (резка, сварка, маркировка, аддитивное производство); оптические элементы, системы и материалы, новые станки для их изготовления; оптоэлектроника, сенсоры, детекторы и оборудование технического зрения.

Среди новинок выставки:

- системы лазерной подгонки резисторов Омега и прецизионной лазерной микрообработки материалов электронной техники МикроСЕТ от компании «Лазерный центр»;
- сверхмощные лазерные маркеры от компании LaserMarker;
- имитаторы солнечного излучения для испытаний космической и наземной аппаратуры от НПО «ГКМП»;
- микроскопная оптика для тепловизионной камеры PI 640 от компании «Теккноу».

Ключевым событием стал **XIV Конгресс технологической платформы «Фотоника»** с конференциями по отраслевым темам.

Сегодня фотоника – это не просто научное направление, а стратегическая отрасль, определяющая технологический суверенитет государств, и у России здесь есть серьёзный научный задел

Все преимущества фотоники базируются на фундаментальных принципах.

Первый – использование лазеров и оптических волокон для передачи информации. Такой подход позволяет передавать данные со скоростью света и минимальными энергопотерями.

Второй принцип – фотонные системы работают на частотах, которые в тысячи раз превышают возможности электронных аналогов.

Третий принцип – это исключительная энергоэффективность. Она обусловлена отсутствием «резистивного нагрева». Другими словами, часть

энергии не теряется через тепло вследствие сопротивления проводников.

Также фотоника активно использует квантовые свойства отдельных фотонов, что особенно важно для создания систем сверхзащищённой связи и квантовых вычислений.

Перспективы фотоники особенно очевидны в трех направлениях. Во-первых, это межчиповые соединения – уже сегодня оптические интерконнекты в дата-центрах передают данные со скоростью до 400 Гбит/с на канал. Во-вторых, нейроморфные вычисления – фотонные процессоры идеально подходят для имитации работы нейронных сетей. В-третьих, квантовые технологии – отдельные фотоны являются идеальными носителями квантовой информации.

Мировые компании уже активно инвестируют миллиарды долларов для того, чтобы занять свою нишу в фотонике. Например, Intel уже давно разрабатывает оптические сопроцессоры, а японская компания Hamamatsu Photonics создала целый научно-промышленный кластер в одноимённом городе Хамамацу, где изучаются возможности лазерных и оптических технологий.

Сегодня фотоника в России развивается на прикладном и научном уровне во многих исследовательских и промышленных центрах. Например, в 2023 году «Телеспутник» писал о планах «Ростеха» по развитию радиофотоники. Новое технологическое направление Госкорпорация планирует осваивать на базе НИИ «Полус» им. М. Ф. Стелмаха холдинга «Швабе». Предполагается, что исследования позволят создать радиофотонные системы, которые будут применимы в лазерных дальномерах, антеннах и радиолокаторах. А дальнейшее развитие фотоники откроет путь к передаче информации на ультравысоких скоростях, что позволит выйти на новый уровень рынка телекоммуникаций.

В октябре 2024 года в интервью редактору «Телеспутника» генеральный директор «Микрона» (входит в ГК «Элемент») Гульнара Хасьянова заявила, что большие перспективы представители рынка видят в гибридных оптоэлектронных сборках – сочетании фотоники и кремниевой электроники.

«Фотоника» – термин чрезвычайно многозначный: англоязычные источники относят его появление к 1954 г., когда Джон Кэмпбелл (John W.

Campbell), американский фантаст и издатель, получивший образование в легендарном Массачусетском технологическом институте и Университете Дьюка, поведал в частном письме немецкому философу Готтарду Гюнтеру (Gotthard Günther): «Я тут, кстати, решил изобрести новую науку – фотонику. Она будет иметь такое же отношение к оптике, какое электроника имеет к электроинженерии». В русскоязычной же традиции принято относить первое употребление термина «фотоника» к 1967 г., когда известный своими трудами в биомолекулярной области академик А. Н. Теренин опубликовал книгу «Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений».

Фотоника – область естественно-научных знаний, охватывающая все системы, в которых информацию переносят именно фотоны, стала активно развиваться с 1960-х гг. – с началом широкого применения лазеров, а позже и оптоволокон. Формально же применение этого термина восходит к 1980-м годам – в первую очередь как раз в приложении к телекоммуникациям. Но одной только передачей данных по оптоволокну исследователи не стали ограничиваться. Предельная для нашей Вселенной скорость света, с которой движутся фотоны, обещала в перспективе выход на невиданную по нынешним меркам производительность логических схем, где вместо электронов переносчиками информации выступали бы кванты электромагнитного излучения, но только проектировать и реализовывать на практике такие схемы оказывается не слишком просто. Но исследователи не опускают руки, хотя прямой замены электронных чипов фотонными в составе ПК, серверов и смартфонов вокруг нас ожидать совершенно точно не стоит.

Первоначально интегральные устройства, реализующие на практике идеи фотоники, имели отношение в основном к телекоммуникациям и потому в качестве материальной основы для их построения брались вещества, оптимальные с оптической точки зрения: легированное кварцевое стекло, ниобат лития, фосфид индия и т. п. Оптоэлектроника на линиях связи была и остаётся составной: электроника на кремниевой основе – отдельно; терминальные узлы для приёма/отправки оптических сигналов на базе фотоники – отдельно; между ними – соответствующие преобразователи. Однако, электронные схемы только тогда на-

чали применять, когда стали интегрированными и тем самым пригодными к массовому серийному производству со значительным снижением себестоимости единицы продукции.

По этой причине интегральные решения для фотоники также представляются наиболее перспективными. Кремний (поли)кристаллический – также подходящий для создания (около) оптических систем: он прозрачен для инфракрасного излучения (с длиной волны более 1 мкм), а безразмерный коэффициент преломления для него составляет около 3,5 – в случае ближнего инфракрасного диапазона. Для сравнения: различные сорта оптических стёкол, идущих на изготовление линз для работы с видимым светом, преломляют тот с показателем в диапазоне от 1,4 до 2,2. Следовательно, отклонять потоки ИК-излучения кремниевая линза сможет весьма эффективно, даже обладая небольшими физическими габаритами (точнее, оптической апертурой). А раз так, то в теории ничто не препятствует созданию чисто кремниевых интегральных схем для нужд фотоники, где электронные и оптические компоненты будут располагаться на единой подложке.

Сегодня кремниевая фотоника (silicon photonics, SiPh) представляет собой бурно развивающееся ИТ-направление, материальной основой для которого служат гибридные квантово-оптические интегральные микросхемы (photonic integrated circuits, PIC), далее – КОИС; называть их просто «фотонными» не совсем корректно, поскольку там присутствуют и электронные компоненты. Изготавливают PIC/КОИС методами классической фотолитографии, применяя пластины кремния на изоляторе (silicon on insulator, SOI), что обеспечивает приемлемую себестоимость и массовость получаемой продукции.

Кроме того, на выставке компании (LaserMarker, «Лазерные компоненты», «АСЕПТИКА» и АО «Теккноу»), чтобы протестировать оборудование вживую, представили передовые разработки для производства, тестирования и обработки материалов [4]. От мощных лазерных маркеров с пиковой мощностью 100+ кВт до микроскоп-оптики для выявления перегрева на микросхемах и специализированных тележек для чистых помещений. Компания LaserMarker продемонстрирует на своем стенде семь лазерных станков, в том чис-

ле новинку – лазерный маркер с излучателем JPT MORA M8.

Компания LaserMarker уже более 15 лет поставляет на российский рынок лазерное и другое ЧПУ-оборудование под собственными торговыми марками LiMark и LiONE и имеет большую складскую программу станков и комплектующих.

Кроме того, на выставке «Фотоника-2026» были представлены следующие образцы оборудования:

1. Лазерный маркер LiMark Fiber JPT MORA M8, 50Вт

Серия M8 была специально оптимизирована для пиковой мощности импульса и качества луча, обеспечивая исключительные характеристики луча даже при работе на высокой мощности. Благодаря максимальной пиковой мощности, превышающей 100 кВт, эта серия особенно подходит для сложных задач, таких как сверление стекла, где высокая пиковая мощность и яркость являются критически важными требованиями.

2. Лазерный маркер ультрафиолетовый LiMark UV 10W JPT

Там, где обычные волоконные и CO₂-установки бессильны, легко справится с задачей мощный ультрафиолетовый 10W лазерный маркер. Благодаря уникальным свойствам излучения современная установка на высоком уровне маркирует самые разные материалы, при этом не допуская перегрева и деформаций.

Для UV лазерного маркера 10W характерны высокая точность и производительность при выполнении маркирования пластика, бумаги, стекла, керамики, резины, кожи, металла и ПВХ.

3. Лазерный маркер LiMark FLY UV 5W CCD с конвейером (с машинным зрением).

Это совершенно новый тип волоконных маркеров с конвейерной линией и CCD-камерой. В данной модели используется технология визуального позиционирования для достижения эффективной, быстрой и точной маркировки, а также экономии ручного труда. Вне зависимости от положения детали камера распознает ее и нанесет маркировку ровно там, где требуется. Технология применима для ультрафиолетовых и волоконных маркеров с рабочим полем до 200*200 мм. Конвейер, камера и специальная бестеневая лампа входят в комплект поставки. Для UV лазерного маркера характерны высокая точность и производительность при выполнении маркирования пластика, бумаги, стекла, керамики, резины, кожи, металла и ПВХ.

Основу, представляемой компанией «Лазерные компоненты» продукции, составляет лазерная оптика (зеркала, светоделители, окна, компоненты поляризации, оптические клинья, дифракционные решетки, прецизионные диафрагмы и прочее), а также широкий спектр лазерных модулей и комплектующих к ним.



В последние годы компания «Лазерные компоненты» занимается активным продвижением на российском рынке оборудования для изготовления и обработки оптических деталей, которое включает в себя установки для варки, прессовки и резки оптического стекла, станки для механической обработки оптических поверхностей, установки для центрирования оптических элементов, установки для нанесения оптических покрытий и прочее специальное оборудование как для автоматизированного, так и для ручного оптико-механического производства.



АО «Теккноу» представило микроскоп-оптику для тепловизионной камеры PI 640

Современные электронные устройства становятся все более компактными и функционально насыщенными, что повышает требования к контролю качества на этапе производства и тестирования печатных плат. Микроскопические компоненты, плотная компоновка и высокие частоты создают зоны локального перегрева, которые сложно выявить стандартными тепловизионными методами.

Для решения этой задачи АО «Теккноу» разработало микроскоп-оптику для тепловизионной камеры PI 640. Решение позволяет обнаруживать изменения температуры на объектах размером до 8 мкм и одновременно проверять компоненты платы с формированием ИК-изображения.

Ключевые преимущества:

- сменные объективы с фокусировкой для гибкого использования камер;
- частота кадров до 125 Гц для мониторинга быстрых процессов (например, пульсации лазерных светодиодов);
- погрешность измерения $\pm 2^\circ\text{C}$ или $\pm 2\%$;
- запись радиометрического видео;
- безлицензионное ПО для анализа и полный комплект SDK в базовой комплектации.

Выставка «Фотоника. Мир лазеров и оптики-2026», XIV Конгресс технологической платформы [5] и все мероприятия показали свои инновационные разработки и образцы оборудования и свидетельствуют, что отрасль быстро и усиленно развивается.

Литература:

1. <https://www.vniiftri.ru/press/news/vniiftri-predstavit-innovatsionnye-razrabotki-na-vystavke-fotonika-2026->
2. <https://www.vniiftri.ru/press/news/vniiftri-prinimaet-uchastie-v-konferentsii-tsifrovaya-obrabotka-signalov-i-ee-primenenie-dspa-2025/>
3. <https://www.vniiftri.ru>
4. https://www.expocentr.ru/ru/press-center/press-releases/fotonika-2026-press-reliz/?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ruhttps://
5. www.photonics-expo.ru

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОБЛАСТЯХ METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF INDIRECT MEASUREMENTS IN EXTREME AREAS

Шурин К. В., д.т.н., профессор,
 Воейко О.А., к.т.н., доцент, ТУ им. А.А. Леонова (филиал) МИИГАиК,
 Михеева Н.В., аспирант, ТУ им. А.А. Леонова (филиал) МИИГАиК,
 Shchurin K.V., Doctor of Technical Sciences, Professor,
 E-mail: tteng@mail.ru, +7 (985) 712-31-12
 Voeiko O.A., Ph.D. in Engineering, Associate Professor,
 TU A.A.Leonov (Branch) MIIGAiK
 E-mail: voeiko@ut-mo.ru, тел. +7 (903) 750 03-70
 Mikhееva N.V., post-graduate student TU A.A.Leonov (Branch) MIIGAiK
 E-mail: natasha3012881@rambler.ru; +7 (917) 547-73-74

Аннотация. В работе выполнен анализ развития систем измерений в смысловом и хронологическом аспектах. Рассмотрены оптимальные системы применительно к экстремальным областям измерений. Предложены пути сокращения номенклатуры единиц измерений и фундаментальных констант вместе с повышением их точности.

Abstract. This paper analyzes the development of measurement systems in conceptual and chronological terms. Optimal systems for extreme measurement areas are considered. Ways to reduce the range of units of measurement and fundamental constants while improving their accuracy are proposed.

Ключевые слова: экстремальная метрология, косвенные измерения, физические величины, единицы измерений, физические и геометрические константы, оптимизация, постоянная Планка.

Keywords: extreme metrology, indirect measurements, physical quantities, units of measurement, physical and geometric constants, optimization, Planck's constant.

Введение

Предложенный нами термин «экстремальная метрология» [1] предполагает проведение множества косвенных измерений в областях, близких к квазиабсолютным минимуму и максимуму: в диапазонах минимумов – от нано (10^{-9}) – до уото (10^{-24}) – областей, и в диапазонах максимумов – от тера (10^{12}) – до уойта (10^{24}) – и других областей высоких порядков, например, внесистемных единиц массы и длины (атомная единица массы, световой год, парсек) и др.

Очевидно, что прямые измерения в экстремальных областях (ЭО) невозможны по совокупности организационно-технических причин, поэтому основным методом измерений являются косвенные, в процессе которых искомые значения физических величин (ФВ) определяют на основании результатов прямых измерений других ФВ, преобразуемых в искомую с помощью известных функциональных зависимостей. В ЭО точность измерений определяется как метрологическими характеристиками средств измерений (СИ), ограниченных, прежде всего, технологическими возможностями изготовителей и условиями измерений, так и функциональными зависимостями, используемыми при переходе от показаний средств

измерений к реальным параметрам ФВ. Таким образом, в ЭО требования к точности промежуточных вычислений возрастают на десятки порядков.

Следует отметить, что номенклатура фундаментальных физических и геометрических констант и связанных с ними основных единиц измерений неоправданно расширены, что формирует дополнительные погрешности в результатах измерений, расширяя границы доверительных интервалов [2], т.е. увеличивая энтропию результатов. Сегодня установлено, что среди семейства фундаментальных физических констант существует только пять первичных суперконстант – три размерные и две безразмерные. Таким образом, в современной физике многие константы необоснованно наделены фундаментальным статусом, поскольку они не являются первичными константами. В этой связи уместно вспомнить правило Оккама, в соответствии с которым «не следует без необходимости увеличивать число сущностей», и утверждение Френеля о том, что «природа склонна к управлению многим с помощью малого». С большой вероятностью можно утверждать, что и среди пяти суперконстант имеются кандидаты на снижение статуса.

Методика и результаты исследования

В качестве основных величин целесообразно выбрать те, которые отражают наиболее общие свойства материи. Поскольку формой существования материи является пространство и время, естественно включить в число основных единицы длины и времени. Так как одной из наиболее общих характеристик материи является масса, то в большинстве систем в качестве третьей основной единицы принимают единицу массы. Подобная система, построенная на этих трех единицах (длины, массы и времени), впервые была предложена в 1832 году Гауссом и названа им абсолютной системой.

С момента введения предложенной К. Гауссом системы единиц, соответствующей величинам MLT (масса-длина-время), она не изменялась около 60 лет. Далее происходили изменения, связанные только с увеличением номенклатуры основных величин: с 1889 года развитие электротехники обусловило необходимость введения в систему MLT единицы электромагнитной величины – силы тока, и с 1935 года была официально узаконена система MLTI.

В 1948 году появилась система СИ с добавлением к числу основных еще трёх величин, и в настоящее время в качестве основных в системе СИ приняты 7 единиц: длины, массы, времени, силы электрического тока, термодинамической температуры, количества вещества и силы света, размерности которых определены ГОСТ 8.417–2002, а их физическая сущность раскрыта в работах [3–5] и др.

В задачи настоящей статьи не входит анализ определения и содержания основных единиц СИ, однако отметим, что по-настоящему основной с некоторой долей условности можно признать лишь секунду – продолжительность 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133, не возмущённого внешними полями (решение XIII ГКМВ, 1967 г.). Остальные основные единицы СИ, принятые ГКМВ в период 1948–1983 гг., определяются друг через друга или даже через производные и внесистемные единицы.

В контексте предпринятого нами исследования наибольший интерес вместе с единицей времени представляет единица длины метр – длина пути, проходимого светом в вакууме за 1/299792458 доли секунды (решение XVII ГКМВ в 1983 г.). Отметим, что метр определяется через секунду с использованием фундаментальной физической константы (ФФК) – скорости света в вакууме, что позволяет нам утверждать, что единица длины в числе основных единиц СИ избыточна и является производной единицей.

С учётом приведенного выше определения секунды численное значение метра включает 19 разрядов. При этом следует акцентировать чрезвычайно важный методологический момент: значение скорости света в рамках существующей СИ определяется как функция одного из параметров излучения атома цезия-133. В этом заключена глубокая физическая и философская основа, объединяющая стремление фундаментальной науки к созданию целостной картины мира, – единого подхода к исследованиям мира элементарных частиц и мира Вселенной, в областях, стремящихся соответственно к 0 и ∞ . Этот подход объединяет полюса экстремальной метрологии, создавая предпосылки единой методологии измерений в нано-уото и тера-уота областях.

Следует декларировать бесспорную необходимость осуществления высокоточных вычислительных операций в процессах косвенных измерений объектов экстремальной метрологии. Сказанное относится как к вариантам применения основных единиц СИ, так и к вариантам с использованием большинства производных единиц СИ и некоторых внесистемных единиц. При этом во втором случае требования к точности вычислительных операций возрастают на многие порядки. В подтверждение сказанному рассмотрим пример, в котором проанализируем формулу размерности одной из ключевых производных единиц СИ – электрической ёмкости (F, Ф – фарад). Эта формула записывается через размерности основных единиц СИ в виде

$$\dim \Phi = L^{-2} M^{-1} T^4 I^2,$$

где L , M , T , I – соответственно размерности длины (m – метр), массы (kg – килограмм), вре-

мени (s – секунда) и силы электрического тока (ампер). Таким образом, $\Phi = \text{м}^{-2}\text{кг}^{-1}\text{с}^4\text{А}^2$.

В то же время нам известно, что содержание каждой из четырёх основных единиц СИ, входящих в размерность электрической ёмкости, представляет собой многоразрядное число, в котором в случае измерений в ЭО нельзя пренебрегать ни одной из значащих цифр, и, более того, количество значащих цифр по мере приближения областей измерений к максимальному или минимальному экстремуму должно соответствующим образом увеличиваться. С учетом того, что в нашем примере размерности основных единиц СИ входят в степени, вплоть до четвёртой, требования к точности определения численного значения электрической ёмкости применительно к задачам экстремальной метрологии многократно возрастают. Такая же аргументация может быть принята для обоснования приемлемой точности при использовании некоторых экстремальных внесистемных единиц, допускаемых к применению наравне с единицами СИ: атомной единицы массы ($\approx 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{кг}$); единицы энергии – электрон-вольт ($1,602176487(40) \cdot 10^{-19} \text{Дж}$, где Дж – кандела единица силы света); единицы длины – парсек ($\approx 3,08568 \cdot 10^{16} \text{м}$) и др.

Наличие знаков « $\approx$ » в численных значениях приведенных внесистемных единиц указывает единственно на требование к повышению точности численных значений единиц и недопустимость пренебрежения в ЭО хотя бы одной значащей цифрой.

Другой пример. С учетом значений скорости света ($2,99792458 \cdot 10^8 \text{м/с}$) и продолжительности года ($3,5576 \cdot 10^7 \text{с}$) расстояние, равное одному световому году, определяется как $L_{\text{сг}} = (2,99792458 \cdot 10^8) \cdot (3,5576 \cdot 10^7 \text{с}) = 10,66541648580 \cdot 10^{15} \text{м}$.

В Масштабе Вселенной световой год является «мелкой» внесистемной единицей длины. Ближайшая к нам звезда, Проксима Центавра, находится на расстоянии около 1,3 парсека (4,2 световых года) от Солнца. Большинство звезд, видимых невооруженным глазом, находятся на расстоянии нескольких сотен парсек от Солнца, самые удаленные – на расстоянии нескольких тысяч парсеков, а Галактика Андромеды – на расстоянии более 700 000 парсеков. Очевидно, что

при решении астрономических и навигационных задач вольное обращение с приближениями может привести к ошибкам, исчисляемым сотнями триллионов м.

С начала 20 века предпринимались многочисленные попытки оптимизации систем измерений с позиции концепции «необходимо и достаточно», частично изложенных в работах [8–11].

Еще до официальной легитимизации системы СИ английским физиком-теоретиком Д. Хартри в 1928 году [3, 5] была предложена естественная система единиц, применяемая в разделах физики, где в расчетах используется заряд и масса электрона, например, в атомной физике, и квантовой электродинамике. В честь Д. Хартри названа атомная единица измерения энергии (E_h), применяемая в атомной физике и вычислительной химии. Энергия Хартри равна абсолютному значению электрической потенциальной энергии атома водорода в основном состоянии. $E_h = 4.35974434(19) \times 10^{-18} \text{Дж}$.

Основными единицами измерения в атомной системе единиц Хартри являются заряд электрона, масса электрона и редуцированная постоянная Планка $\hbar$, числовые значения которых полагаются равными единице.

Недостатками системы Хартри являются далёкие от практики значения производных единиц; значения некоторых постоянных известны с недостаточной точностью; при этом их уточнение потребовало бы изменения образцовых мер, а открытие новых физических явлений или закономерностей может привести к существенному изменению соотношений между значениями единиц, принятых за основные.

В 1965 году советский ученый и авиаконструктор Р.О. ди Бартини обосновал и рекомендовал использовать систему величин LT, в которой присутствуют размерности только двух физических величин (ФВ): длины и времени, теоретической основой которой является признание истинности принципа эквивалентности гравитационной и инертной масс [6, 7]. Ди Бартини назвал свою систему «кинематической системой размерностей». В таблице 1 приведены размерности некоторых электромагнитных величин.

Таблица 1

Размерности некоторых электромагнитных величин по Р.О. ди Бартини.

D^n	№ п/п	Символ величины	Наименование величины	Единица СИ	Единица Бартини
-2	1	ρ	Объемная плотность заряда	Кл/м ³	$L^0 T^{-2}$
	2	ϕ	Плотность тока	А/м ²	$L^1 T^{-3}$
-1	1	Υ	Удельная проводимость	Ом ⁻¹ м ⁻¹	$L^0 T^{-1}$
	2	B	Магнитная индукция	Тл	$L^0 T^{-1}$
	3	f	Частота	Гц	$L^1 T^{-2}$
	4	R_m	Магнитное сопротивление	А/Вб	$L^1 T^{-2}$
	5	E	Напряженность электр. поля	В/м	$L^1 T^{-2}$
	6	D	Электрическое смещение	Кл/м ²	$L^1 T^{-2}$
	7	σ	Поверхностный заряд	Кл/м ²	$L^1 T^{-2}$
	8	H	Напряженность магн. поля	А/м	$L^2 T^{-3}$
0	1	m_0	Магнитная постоянная	Гн/м	$L^{-2} T^2$
	2	R	Электр. сопротивление	Ом	$L^{-1} T^1$
	3	E_0	Электрическая постоянная	Ф/м	$L^0 T^0$
	4	G	Электр. проводимость	См	$L^1 T^{-1}$
	5	A	Векторный маг. потенциал	Вб/м	$L^1 T^{-1}$
	6	V_e	Электрический потенциал	В	$L^2 T^{-2}$
	7	τ	Линейный заряд	Кл/м	$L^2 T^{-2}$
	8	I	Сила электрического тока	А	$L^3 T^{-3}$
	9	P	Мощность	Вт	$L^3 T^{-5}$
1	1	Λ	Магнитная проводимость	Вб/А	$L^{-1} T^2$
	2	L	Индуктивность	Гн	$L^{-1} T^2$
	3	ρ	Удельное сопротивление	Ом м	$L^0 T^1$
	4	C	Емкость электрическая	Ф	$L^1 T^0$
	5	O	Магнитный поток	Вб	$L^2 T^{-1}$
	6	ψ	Потокосцепление	Вб	$L^2 T^{-1}$
	7	q	Электрический заряд	Кл	$L^3 T^{-2}$
	8	W	Энергия	Дж	$L^5 T^{-4}$
2	1	P	Электр. момент диполя	Кл м	$L^4 T^{-2}$
	2	j	Магнитный момент диполя	А/м ²	$L^5 T^{-3}$

Каждая ячейка таблицы 1 имеет несколько слоев по числу физических величин одной размерности. Например, ячейка размерностью $L^3 T^{-2}$ содержит качественно разные величины: масса, количество электричества, «количество магнетизма». Сумма показателей радикалов размерности называется димензиальным объемом (первый столбец таблицы 1).

$$D^{n+\gamma} = C^\gamma T^n = L^\gamma T^{n-\gamma}, \quad (1)$$

где C – фундаментальная скорость; n, γ – целые числа.

В работе [8] дан развёрнутый анализ основных преимуществ и недостатков системы LT и предложены пути её совершенствования.

С.А. Кононогов [9–11] обосновывает другой путь: не прибегая к кардинальному изменению системы СИ, повысить точность фундаменталь-

ных физических констант (ФФК) и переопределить единицы измерений СИ.

Для повышения точности и стабильности измерений необходимо переходить к квантовым стандартам (эталонам). Такой переход является основным направлением совершенствования эталонной базы метрологических организаций многих стран. Разработка, внедрение и применение квантовых стандартов единиц физических величин наивысшей точности базируется на использовании значений ФФК, таких как скорость света c , постоянная Планка h , постоянная Больцмана k , массы и заряды элементарных частиц – электрона, протона и т. д. Более того, процессы определения точных значений ФФК и повышения точности реализации физических единиц взаимосвязаны.

Количественные характеристики всех практически используемых физических явлений в окру-

жающем нас мире могут быть определены на основе существующих в настоящее время теорий фундаментальных взаимодействий – гравитационного, электромагнитного, слабого, сильного – и значений ФФК, используемых в этих теориях. Проведенный анализ данных по возможным вариациям констант взаимодействий связан как с новейшими физическими исследованиями, так и с практической реализацией реформы в фундаментальной метрологии – введением новых определений основных единиц системы СИ [11].

В экстремальной метрологии высокую степень точности измерений, наряду с точностью используемых ФФК, определяют геометрические константы, в первую очередь, – фундаментальные геометрические константы (ФГК) π и e , максимально используемые в вычислительной математике.

Обозначение числа π происходит от греческого слова $\pi\epsilon\rho\iota\phi\epsilon\rho\iota\alpha$ («окружность»), а числом π называется отношение длины окружности к её диаметру. Письменная история числа π восходит к 2000 годам до нашей эры, но оно было известно еще древним людям и обратило на себя их внимание ещё в те времена, когда они не имели возможности письменного изложения своих знаний.

Впервые обозначение π использовал в 1706 году английский математик У. Джонс, но общепринятым оно стало после того, как его, начиная с 1736 года, ввел в систематическое употребление Леонард Эйлер. В конце 18 века И. Ламберт и А. Лежандр установили, что π является иррациональным числом, т.е. не может быть выражено в виде обыкновенной дроби, а в 1882 году Ф. Линдман доказал, что оно трансцендентное, т.е. не может удовлетворять никакому алгебраическому уравнению с целыми коэффициентами.

На протяжении всего времени существования числа π , вплоть до наших дней, развитие прикладных наук обусловило своеобразную «погоню» за десятичными знаками числа π . С учетом особенностей косвенных измерений в ЭО решение задачи повышения разрядности геометрических констант имеет исключительное значение.

Леонардо Фибоначчи в начале 13 в. определил три первых точных десятичных знака числа π . В 16 в. Андриан Антонис определил 6 таких знаков. Франсуа Виет получил 9 точных десятичных

знаков. В 1844 году З. Дазе вычисляет 200 знаков после запятой числа π , в 1847 году Т. Клаузен получает 248 знаков.

Весьма плодотворным оказался 1853 год: И. Рихтер вычисляет 330 знаков, 440 знаков получает З. Дазе и в этом же году У. Шенкс получает 513 знаков.

Следует отметить, что европейских исследователей в решении рассматриваемой проблемы на многие столетия опередили учёные Востока:

- в V веке китаец Цзю Чунчжи вычислил число $\pi \approx 3,141592$, что точнее, чем в Европе до XVII века;
- персидский математик IX века Аль-Хорезми дал приближение числа π как частного от деления $22 : 7$;
- индийский математик Мадхава в XV веке предложил бесконечный ряд

$$\pi = 4 \cdot (1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + 1/9 - \dots).$$

При помощи этой формулы, используемой и сегодня, возможно производить вычисление числа π до бесконечности с необходимой точностью.

Известное отставание европейской математики от восточной нетрудно объяснить практически полным отсутствием научных коммуникаций в те годы.

С появлением ЭВМ количество верных десятичных знаков резко возрастает: 1949 год – 2037 десятичных знаков (Джон фон Нейман), 1958 год – 10000 десятичных знаков (Ф. Женюи), 1961 год – 100000 десятичных знаков (Д. Шенкс), 1973 год – 10000000 десятичных знаков (Ж. Гийу и М. Буйе), 1986 год – 29360000 десятичных знаков (Д. Бейли), 1987 год – 134217000 десятичных знаков (Я. Канада), 1989 год – 1011196691 десятичных знаков (Д. Гудновски и Г. Гудновски).

Постоянная $e = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 + \frac{1}{n})^n \approx 2,71828\dots$ появилась много позднее π . Впервые обозначение « e » ввёл Леонард Эйлер (1707–1783). Он также вычислил точные 23 десятичных знака этого числа, используя представление числа e в виде бесконечного числового ряда, полученное Даниилом Бернулли. Число e иррационально и трансцендентно; его трансцендентность была доказана только в 1873 году Шарлем Эрмитом. Предполагается, что e – нормальное число, то есть вероятность появления разных цифр в его записи одинакова.

Л. Эйлер получил замечательный результат, связывающий числа π и e

$$i = \sqrt{-1}:$$

$$e^{i\pi} = -1. \quad (2)$$

Исследования других фундаментальных констант показали, что все они являются взаимозависимыми.

Физика оперирует двумя классами констант – физическими и геометрическими. Результаты исследования фундаментальных физических констант показывают, например, что постоянная тонкой структуры одновременно является и физической, и геометрической константой, а её связь с другими физическими константами (постоянной Планка, скоростью света и др.) есть детерминированное проявление глубокой взаимосвязи физики и геометрии. При этом уместно сослаться на мнение А. Пуанкаре о дополнительности физики и геометрии, согласно которому «...на опыте мы всегда наблюдаем некую сумму физики и геометрии..., и эта сумма должна проявляться в виде единого константного базиса...».

Аргументируя последний тезис, покажем взаимосвязь, выявленную между тремя важнейшими безразмерными константами: постоянной тонкой структуры, числом π и «золотым отношением» F , определяемым на основе чисел Фибоначчи. Соотношение имеет вид

$$\alpha^{20} = \sqrt[13]{\pi F^{14}} \cdot 10^{-43}, \quad (3)$$

где: $F = 1,6180339...$

То, что α и π оказались связанными с «золотым отношением» F указывает на тесную связь числа π и закона гармонии в Природе. Из этого следует, что две безразмерные геометрические константы π и F необходимы и достаточны для метрологического применения Всеобщего геометрического константного базиса. На их основе, выполняя промежуточные расчёты с использованием известных зависимостей, несложно получить другие константы.

Через ФФК постоянную тонкой структуры определяют как

$$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{e^2}{2\epsilon_0 \hbar c}, \quad (4)$$

где E_0 – электрическая постоянная; e – элементарный электрический заряд; c – скорость света в вакууме; h – постоянная Планка; $\hbar$ – приведённая постоянная Планка (постоянная Дирака).

Значение постоянной Планка зафиксировано в 2019 г. и принимается равным $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ кг·м²·с⁻¹ (Дж·с). Постоянные Дирака и Планка связаны соотношением

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}. \quad (5)$$

Определение постоянной Планка через геометрические константы (3) и физические (4, 5).

С целью создания современной эталонной базы в настоящее время Международное бюро мер и весов пересмотрело определения следующих единиц измерения [10, 11]:

- килограмм;
- кельвин;
- моль;
- ампер

Названные единицы измерения определяют на основе ФФК – постоянной Планка (килограмм), постоянной Больцмана (кельвин), числе Авогадро (моль), величине заряда электрона (ампер). Следует отметить, что величины постоянной Больцмана, числа Авогадро и заряда электрона могут быть определены через постоянную Планка [4, 12–14], что даёт нам возможность сократить количество используемых констант в процессе переопределения единиц СИ.

В отличие от многочисленных, ранее разработанных способов достижения цели повышения точности констант, предложен программный комплекс [1], основным преимуществом которого является возможность вычислений с любым количеством разрядов у операндов на обычных персональных компьютерах с конечной разрядной сеткой. Единственным ограничением является объём оперативной памяти.

В качестве базовой концепции вычислений предложена программная реализация метода Эйлера и программная реализация метода Рунге-Кутты в длинной арифметике для решения уравнения $dy/dx=f(x,y)$ с заданным начальным условием.

При этом рассматриваются программные реализации решения уравнения Лапласа $\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0$ для прямоугольной области с двухслойной границей: одна реализация в обычной арифметике, вторая – в длинной арифметике.

Разработанный алгоритм длинной арифметики позволил выполнять все арифметические операции с произвольным количеством разрядов в целой и дробной частях операндов.

На базе длинной арифметики было реализовано решение системы конечно-разностных уравнений на однопроцессорном и многопроцессорном комплексах.

Для однопроцессорного комплекса программная реализация была выполнена в среде BORLANDC++ для WINDOWS, для многопроцессорного комплекса – на алгоритмическом языке C для UNIX [1].

Заключение.

Анализируя изложенное, следует констатировать, что легитимной основной единицей всех систем измерений является единица времени – секунда. Остальные единицы СИ и других систем являются производными и могут быть определены с использованием числового значения секунды и фундаментальных констант: ФФК (постоянная Планка (или связанная с ней постоянная тонкой структуры и скорость света в вакууме) и ФГК (число π и «золотое отношение» Φ).

При измерениях в ЭО перспективным представляется использование LT системы ди Бартини или, что предпочтительнее, её модернизация в Т-систему, учитывая очевидность взаимного преобразования единиц L в T с использованием ФФК скорости света в вакууме.

Проблемой вычислительной части косвенных измерений в экстремальной метрологии является повышение точности (увеличение разрядности чисел) основных величин – единицы времени s , ФФК и ФГК, поименованных выше. Решение этой проблемы при наличии мощных ЭВМ и соответствующего программного обеспечения не вызовет затруднений.

Литература

1. Чепасов, В.И. Вычислительные методы в решении экстремальных метрологических задач / В.И. Чепасов, К.В. Щурин, В.Д. Шевеленко, М.В. Николаев. – Оренбург: изд. ОГУ, 2012. – 541 с.
2. Щурин, К.В. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие для вузов / К.В. Щурин, Е.К. Волкова. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 336 с.
3. Власов, А.Д., Мурин Б.П. Единицы физических величин в науке и технике / А.Д. Власов, Б.П. Мурин. – М., Энергоатомиздат, – 1990, 176 с.
4. Томилин, К.А. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. М.: Физматлит, 2006. – 368 с.
5. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности: Учебно- справочное руководство. – 3-е изд., перераб. и доп. -М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит., 1988. – 432 с.
6. Бартини, Р.О. Некоторые соотношения между физическими константами // Доклады Академии наук СССР. – М.: АН СССР. – 1965, том 163, №4, С. 861–864.
7. Бартини, Р.О. О множественности геометрий и множественности физик / Р.О. Бартини, П.Г. Кузнецов // Проблемы и особенности современной научной методологии. – Свердловск: АН СССР, Урал. науч. центр. – 1978, с.55–65.
8. Коган, И.Ш. Система величин на основе длины L и времени T: Proet Contra. // Законодательная и прикладная метрология. – 2012. – №3. – С. 63–70.
9. Кононогов, С.А. Фундаментальные физические константы, гравитационная постоянная и проект космического эксперимента SEE / С.А. Кононогов, В.Н. Мельников // Измерительная техника. – 2005. – № 6. – С.3-10.
10. Кононогов, С.А. О системах единиц и предложениях по переопределению основных единиц СИ. // Метрология. – 2007. – № 2. – С. 58–63.
11. Кононогов, С.А. Метрология и фундаментальные физические константы: монография / С. А. Кононогов. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 270 с.
12. Формула Планка. – Рувики: Интернет-энциклопедия // URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Формула_Планка. (дата обращения 09.01.2026 г.).
13. Категория: Планковские единицы. – Материал из Википедии – свободной энциклопедии // URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Категория: Планковские_единицы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Категория:_Планковские_единицы). (дата обращения 10.01.2026 г.).
14. Томилин, К. А. Планковские величины // 100 лет квантовой теории: История. Физика. Философия: Труды международной конференции. – М.: НИИ-Природа, 2002. – С. 105–113.

ОБЩИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ АВТОНОМНОГО ПОВЕДЕНИЯ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ GENERAL APPROACH TO MODELING THE AUTONOMOUS BEHAVIOR OF FREQUENCY STANDARDS

Васильев А.В., Клейменов Ю.А., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Vasilev A.V., Kleymentov YU. A., Doctor of Engineering Sciences,
FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense of Russia
e-mail: etalon24@mail.ru
тел.: 8 (925) 640-18-00

Аннотация. Рассмотрен общий подход к моделированию автономного поведения стандартов частоты, отличающийся комплексным использованием измерений частоты, проводимых на этапе синхронизации по каналу глобальных навигационных спутниковых систем и относительных измерений частоты внутри группового хранителя частоты и времени в автономном режиме, а также адаптивным выбором интервала усреднения измеренных разностей частот и применением фильтра Калмана к полученным результатам, что позволяет в реальном времени уточнять параметры дрейфа и формировать прогнозные оценки частоты с меньшей ошибкой на интервалах до нескольких недель.

Abstract. A general approach to modeling the autonomous behavior of frequency standards, characterized by the integrated use of frequency measurements carried out at the synchronization stage via the channel of global navigation satellite systems and relative frequency measurements within a group frequency and time keeper in offline mode, as well as the adaptive choice of the averaging interval of the measured frequency differences and the application of the Kalman filter to the results obtained. This allows you to refine the drift parameters in real time and generate predictive frequency estimates with a lower error at intervals of up to several weeks.

Ключевые слова: стандарты частоты, групповой хранитель частоты и времени, моделирования автономного поведения, фильтр Калмана.

Keywords: frequency standards, group frequency and time keeper, autonomous behavior modeling, Kalman filter.

Современные системы навигации, связи и синхронизации предъявляют высокие требования к точности и долговременной стабильности шкал времени. В большинстве случаев передача и хранение шкалы времени осуществляется с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как ГЛОНАСС [1], GPS, Galileo и BeiDou. Сигналы этих систем позволяют регулярно синхронизировать эталоны и средства измерений времени и частоты со шкалой всемирного координированного времени UTC. Однако в ряде ситуаций доступ к спутниковым сигналам может быть ограничен или полностью отсутствовать. Причинами могут быть радиопомехи, экранирование сигналов в помещениях и подземных сооружениях, неблагоприятные условия распространения радиоволн, а также, что особенно актуально в последние годы – применение средств радиоэлектронной борьбы.

В условиях отсутствия внешней синхронизации возникает задача автономного хранения шкалы времени. Под хранением шкалы времени понимается поддержание её непрерывности и максимально возможной близости к эталонной шкале в течение определённого интервала времени без внешних коррек-

тирующих воздействий. Основной проблемой при этом является наличие случайных и систематических нестабильностей генераторов частоты, участвующих в формировании шкалы времени. Даже у высокостабильных опорных генераторов имеются собственные шумовые процессы и медленный дрейф частоты, что приводит к накоплению ошибки времени, растущей с увеличением интервала автономной работы. В результате, точность шкалы постепенно ухудшается, а её расхождение с эталонной шкалой может достигать значительных значений (рисунок 1).

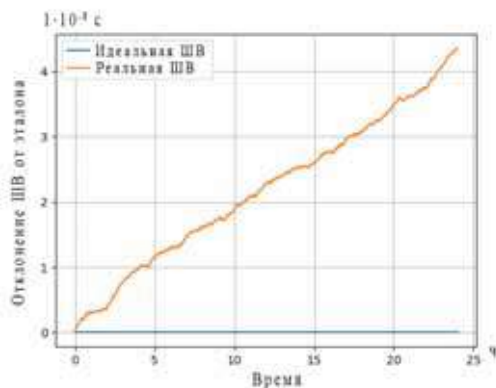


Рисунок 1 – Смещение шкалы времени относительно эталонной с течением времени

Одним из подходов к повышению устойчивости автономного хранения шкалы времени является использование групповых хранителей частоты и времени. В этом случае шкала формируется не одним генератором, а группой из нескольких независимых хранителей (стандартов частоты и времени), объединённых алгоритмом совместной обработки. Каждый из генераторов обладает собственными шумовыми характеристиками и долговременной стабильностью, а объединение их сигналов позволяет частично компенсировать индивидуальные нестабильности. Применение группы уменьшает влияние случайных флуктуаций частоты отдельных генераторов и повышает долговременную стабильность формируемой шкалы времени. Кроме того, использование определенных методов позволяет реализовывать алгоритмы оценки и коррекции параметров отдельных хранителей, что дополнительно улучшает характеристики системы.

Таким образом, исследование методов автономного хранения шкалы времени и разработка алгоритмов формирования шкалы на основе группового хранителя частоты и времени представляет собой важную задачу для систем, функционирующих в условиях ограниченного или отсутствующего доступа к сигналам ГНСС.

При исследовании автономного поведения стандартов частоты важнейшей задачей является выбор адекватной математической модели, описывающей эволюцию частоты во времени. Эта модель должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) адекватность физическим процессам – отражать реальные механизмы, определяющие поведение квантовых стандартов частоты на интервалах автономной работы от нескольких суток до нескольких недель;
- 2) реализуемость оценки – возможность оценки параметров модели по ограниченному объёму измерительной информации, доступной на этапе синхронизации и в автономном режиме;
- 3) прогностическая способность – обеспечение минимальной ошибки прогноза частоты на глубину автономного хода.

Анализ физических процессов, протекающих в водородных стандартах частоты, позволяет выделить основные факторы, определяющие изменение их частоты во времени:

- изменение объема резонатора вследствие температурного воздействия;
- деградация покрытия стенок накопительной колбы;
- изменение давления водорода в источнике;
- старение электронных компонентов системы автоматической подстройки.

Эти процессы, как правило, имеют монотонный характер и на интервалах времени до нескольких недель могут быть аппроксимированы линейными функциями [2]. Более сложные (квадратичные, экспоненциальные) зависимости проявляются лишь на интервалах в несколько месяцев и лет.

Экспериментальные исследования показывают, что поведение реальных водородных стандартов частоты существенно сложнее, чем это предполагается в идеализированных моделях. В частности, установлено, что их дрейф не является строго линейным или постоянным во времени. Вместо этого он подвержен медленным, но заметным случайным изменениям, которые проявляются в виде флуктуаций различной амплитуды и длительности. Эти отклонения носят стохастический характер и могут накапливаться, влияя на долгосрочную стабильность стандарта.

Причины таких флуктуаций многообразны. К ним относятся изменения внешних условий эксплуатации, таких как температура, влажность, механические воздействия и нестабильность электропитания. Существенную роль также играет постепенное старение компонентов устройства – деградация материалов, изменение свойств резонаторов и электронных элементов. Дополнительный вклад могут вносить внутренние шумовые процессы, связанные с физической природой работы водородного стандарта.

Для адекватного описания этого поведения коэффициент дрейфа рассматривается не как фиксированная величина, а как случайный процесс, изменяющийся во времени. Такой подход позволяет учитывать непредсказуемые колебания и строить более реалистичные модели динамики частоты. В рамках этой модели предполагается, что мгновенные изменения дрейфа определяются случайным воздействием, которое не имеет систематического смещения, но характеризуется определённой интенсивностью. Это воздействие обычно интерпретируется как белый шум с гауссовским распределением, что отражает его случайную природу и отсутствие корреляции во времени.

Подобное представление удобно для анализа и последующей обработки данных, поскольку позволяет применять методы теории случайных процессов и статистической фильтрации. В частности, оно широко используется при разработке алгоритмов оценки и компенсации дрейфа, повышающих точность и долговременную стабильность водородных стандартов.

С учетом вышеизложенного, была разработана модель автономного поведения стандартов частоты. В основе модели лежит комплексное использование измерений частоты, проводимых на этапе синхронизации по каналу ГНСС и относительных измерений частоты внутри группового хранителя частоты и времени в автономном режиме, а также адаптивный выбор интервала усреднения измеренных разностей частот и применение фильтра Калмана к полученным результатам, что позволяет в реальном времени уточнять параметры дрейфа и формировать прогнозные оценки частоты с меньшей ошибкой на интервалах до нескольких недель.

Моделирование осуществляется в два этапа:

1. Этап синхронизации – подготовка модели до момента перехода в автономный режим.

Закljučается в калибровке начальных параметров каждого стандарта по абсолютным измерениям, полученным по внешнему каналу сличения. На этом этапе для каждого стандарта методом наименьших

квадратов оцениваются начальное смещение частоты $\hat{y}_{0i}$ и начальный дрейф $\hat{D}_i(0)$, а также их дисперсии $\sigma_{y_{0i}}^2$ и $\sigma_{D_i}^2(0)$. Полученные параметры фиксируются и в дальнейшем, в автономном режиме, не пересматриваются, они служат «якорными» значениями, обеспечивающими привязку частотных характеристик стандартов к абсолютной шкале времени.

2. Этап автономного функционирования – с момента, когда внешний канал сличений стал недоступным.

Представляет собой непрерывный циклический процесс, в котором на основе только относительных измерений разностей частот между стандартами (поступающих от компаратора) в реальном времени уточняются текущие значения дрейфов $\hat{D}_i(t)$ и их дисперсии $\sigma_{D_i}^2(t)$. Ключевыми элементами этого этапа являются адаптивный выбор интервала усреднения для каждой пары стандартов (минимизация комбинированного критерия из дисперсии Аллана и среднего модуля приращений) и совместный фильтр Калмана [3–5], обрабатывающий поступающие в него результаты измерений. Итогом является формирование для каждого стандарта модели автономного поведения, включающей фиксированное начальное смещение, текущую оценку дрейфа и их дисперсии, что позволяет прогнозировать поведение частоты на любой требуемый горизонт.

Структурная схема первого этапа моделирования представлена на рисунке 2.

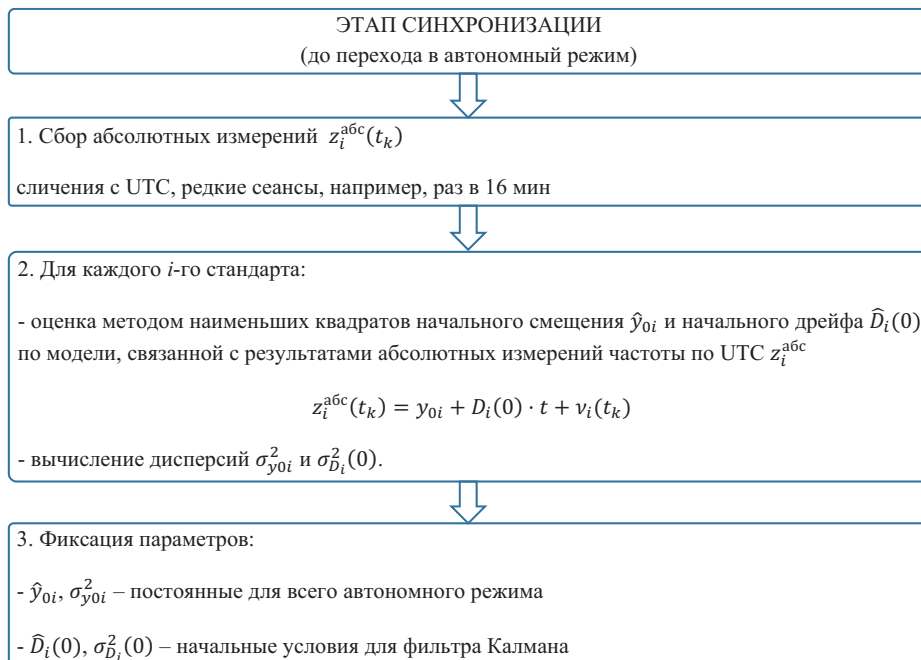
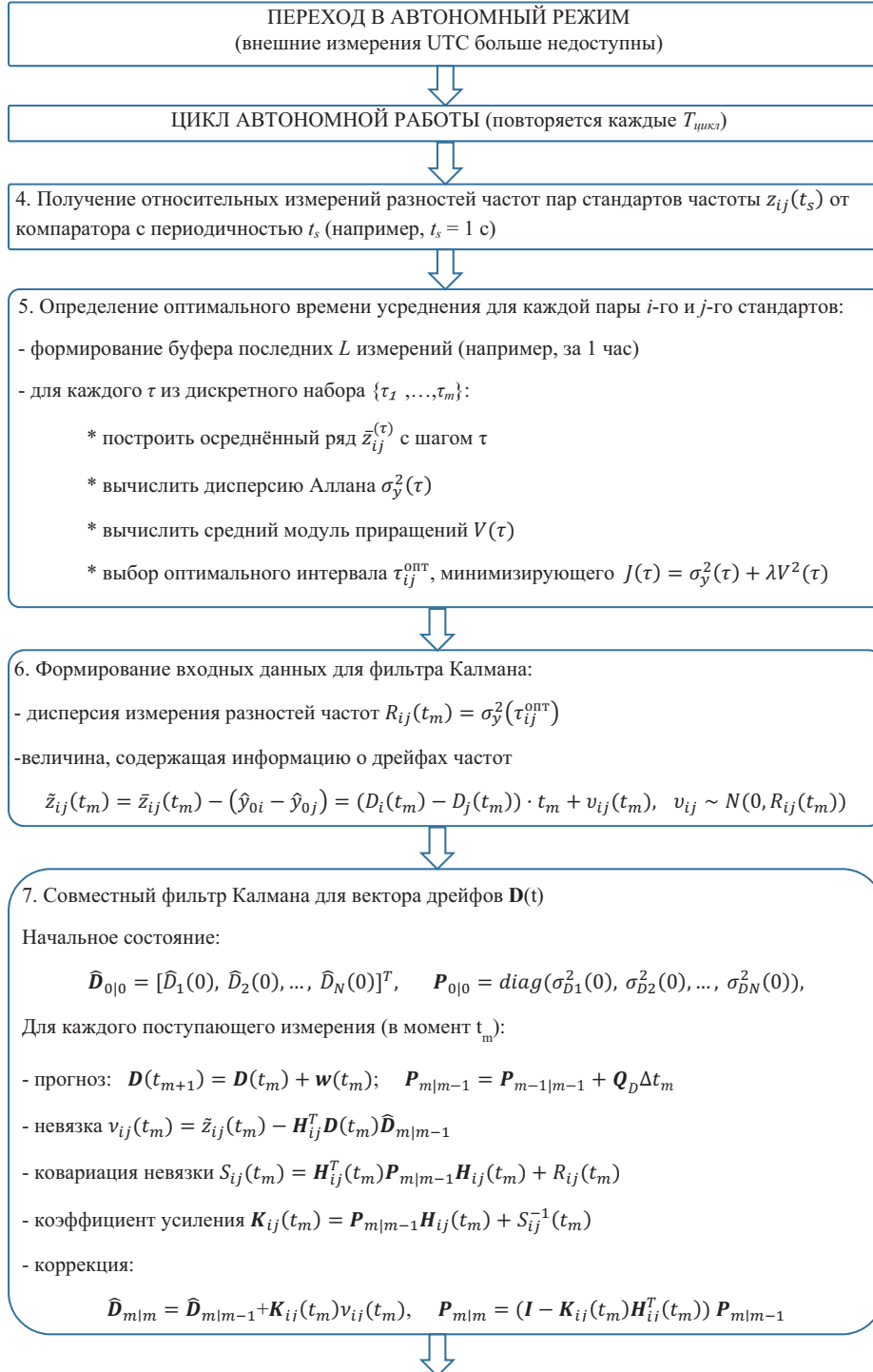


Рисунок 2 – Структурная схема первого этапа моделирования автономного поведения стандарта частоты

Исходными данными для первого этапа являются измерения разности шкал времени группового хранителя относительно UTC, сформированные приемником сигналов ГНСС, усредненные на некотором интервале и пересчитанные в разности частот. Выходными данными являются

оценки начальных смещений частоты и начальных дрейфов $\hat{D}_i(0)$, а также их дисперсии $\sigma_{y_{0i}}^2$ и $\sigma_{D_i}^2(0)$. Данные параметры служат исходными для второго этапа модели (рисунок 3), который начинается с момента потери сигнала ГНСС и перехода в автономный режим.



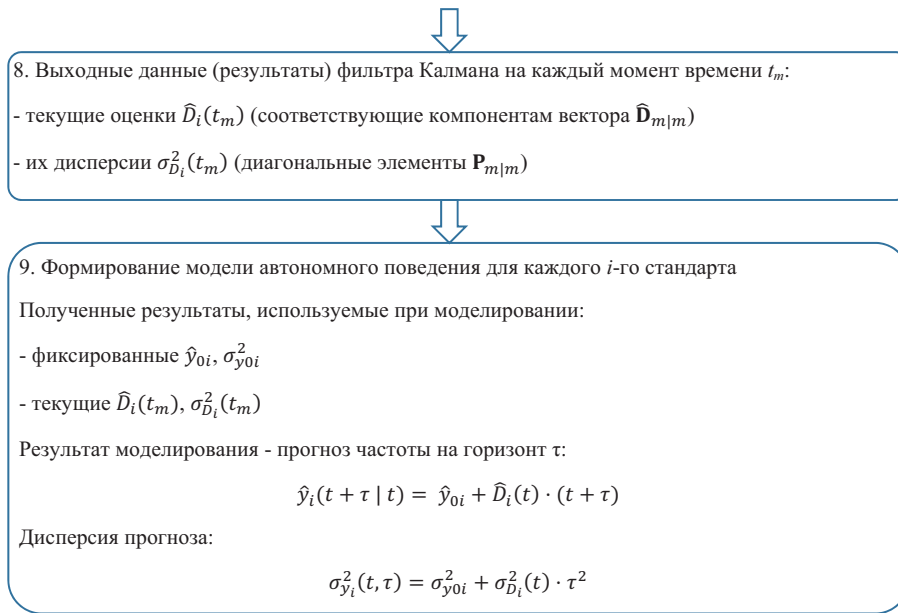


Рисунок 3 – Структурная схема второго этапа моделирования автономного поведения стандарта частоты

Помимо исходной информации, полученной в рамках первого этапа, входными данными на втором этапе служат относительные измерения разностей частот $z_{ij}(t_s)$ с некоторой периодичностью (в экспериментальных исследованиях период составлял 1 с) между стандартами внутри группового хранителя, формируемые компаратором. Для подавления высокочастотных шумов перед подачей в фильтр Калмана они усредняются на интервале τ . Оптимальное значение τ выбирается адаптивно для каждой пары стандартов на основе анализа текущих данных. Анализ осуществляется разработанным адаптивным алгоритмом выбора интервала усреднения относительных измерений, основанный на минимизации комбинированного критерия, включающего в себя дисперсию Аллана $\sigma_y^2(\tau)$ [6] и среднюю скорость изменения (модуль приращения) частоты сигнала $V(\tau)$. Для каждой пары стандартов автоматически, с учётом текущей динамики и уровня шумов, выбирается оптимальный интервал $\tau_{ij}^{\text{опт}}$, обеспечивающий наилучшее соотношение между подавлением шума и сохранением информации об изменениях дрейфа.

Для оценивания и прогноза дрейфов частоты на основании полученных результатов применяется фильтр Калмана. Данный фильтр представляет собой рекурсивный алгоритм оптимальной оценки состояния динамической системы на основе

зашумленных измерений. Его основная идея заключается в последовательном уточнении оценки искомых параметров по мере поступления новой информации. В каждый момент времени формируется текущее представление о состоянии системы, которое затем корректируется с учётом новых наблюдений.

Алгоритм работает в два этапа. На первом этапе осуществляется прогноз: на основе предыдущего состояния и принятой модели эволюции рассчитывается ожидаемое значение параметров в следующий момент времени. При этом учитывается неопределённость модели, связанная с наличием случайных возмущений. На втором этапе выполняется коррекция (обновление): прогноз сопоставляется с фактическими измерениями, и на основе их расхождения уточняется оценка состояния. В результате достигается компромисс между доверием к модели и доверием к измерительным данным.

Важным свойством фильтра Калмана является то, что он учитывает статистические характеристики как шумов измерений, так и внутренних возмущений системы. Это позволяет адаптивно изменять «вес» поступающей информации (более точные измерения оказывают большее влияние на итоговую оценку, тогда как менее надёжные данные сглаживаются).

В контексте задачи разработки модели автономного поведения стандартов частоты фильтр Калмана используется для совместного оценивания дрейфов нескольких стандартов. Он позволяет объединить информацию о взаимных измерениях между стандартами с моделью их временной эволюции и получить наилучшие в статистическом смысле оценки текущих значений дрейфов, а также их прогноз на последующие моменты времени. Такой подход особенно эффективен в условиях наличия случайных флуктуаций и нестабильности характеристик отдельных стандартов.

В результате работы фильтра на каждый момент времени t_m имеются текущие оценки $\hat{D}_i(t_m)$ (соответствующие компонентам вектора состояния $\hat{\mathbf{D}}_{m|m}$) и их дисперсии $\sigma_{D_i}^2(t_m)$ (диагональные элементы ковариационной матрицы $\mathbf{P}_{m|m}$), которые используются для построения модели автономного поведения и передаются в алгоритмы построения ансамблевой шкалы и управления вспомогательным генератором. Фильтр Калмана обеспечивает оптимальное (в смысле минимума среднеквадратической ошибки) слежение за эволюцией дрейфов всех стандартов в реальном времени, используя только относительные измерения разности частот, очищенные от постоянных составляющих.

Разработанная модель позволяет в реальном времени (без пост-обработки) на основании оценки начального смещения $\hat{y}_{0i}$ и его дисперсии $\sigma_{y_{0i}}^2$, а также текущих оценок дрейфа и его дисперсии оценивать поведение каждого стандарта частоты в автономном режиме на основе только относительных внутригрупповых измерений разностей частот, что дает возможность прогноза частоты $\hat{y}_i(t + \tau | t) = \hat{y}_{0i} + \hat{D}_i(t) \cdot (t + \tau)$ и ее дисперсии $\sigma_{y_i}^2(t, \tau) = \sigma_{y_{0i}}^2 + \sigma_{D_i}^2(t) \cdot \tau^2$ на любой горизонт τ .

Таким образом, был рассмотрен общий подход к моделированию автономного поведения стандартов частоты, отличающийся обновлением состояния в реальном времени и учетом как детерминированных, так и случайных составляющих, а также содержанием количественных оценок неопределённости (дисперсии), необходимых в том числе для последующего оптимального построения групповой шкалы времени.

Литература

1. ГОСТ Р 8.930–2016 Государственная система обеспечения единства измерений. Передача единиц времени, частоты и национальной шкалы времени UTC(SU) от Государственного первичного эталона Российской Федерации с использованием системы ГЛОНАСС. Основные положения.
2. Безменов И. В. Теоретические основы построения моделей для описания современных шкал времени и стандартов частоты / И. В. Безменов, И. Ю. Блинов. – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2015. – 528 с.
3. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems / R. E. Kalman // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82, No. 1. – P. 35–45.
4. Пашев Г. П. Применение фильтра Калмана для измерений частот высокостабильных генераторов по сигналам космических навигационных систем / Г. П. Пашев // Измерительная техника. – 2013. – № 12. – С. 35–37.
5. Кануж М. М. Адаптивный ансамбльный фильтр Калмана для слежения за GPS-сигналами при неизвестной и изменяющейся во времени ковариации шума / М. М. Кануж, А. В. Клоков // Гирокоспия и навигация. – 2021. – Т. 29, № 3. – С. 34–51.
6. Allan D. W. Statistics of atomic frequency standards / D. W. Allan // Proceedings of the IEEE. – 1966. – Vol. 54, No. 2. – P. 221–230.
7. Васильев А.В., Окишев Д.А. Разработка методики выбора опорного стандарта частоты и времени по результатам анализа характеристик вторичного эталона единиц времени и частоты // Вестник метролога. – 2023. – № 4. – С. 33–35.

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.pressa-rf.ru/cat/1/edition/e45112/>

