

ВЕСТНИК МЕТРОЛОГА

Научно-технический журнал
Решением ВАК от 18.12.2017 года
включен в «Перечень рецензируемых
научных изданий, в которых должны
быть опубликованы основные научные
результаты диссертаций на соискание
ученой степени кандидата наук, на
соискание ученой степени доктора наук»
(«Перечень...» от 25.12.2017 г. за № 2210).

Учредитель и издатель

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

Почтовый адрес:

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

Редакционный совет:

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

Главный редактор

В.Н. Храменков, доктор технических
наук, профессор

Заместитель главного редактора

О.В. Надеина, кандидат педагогических
наук

В подготовке номера участвовали:

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

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

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

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

Тел./факс (495) 586–23–88; (495) 580–35–66.
E-mail: 32gnii_vm@mail.ru;

Отпечатано ООО «ПРИНТ»

Юридический адрес: 125413, Россия,
г. Ижевск,

Сдано в набор 03.07.2024

Подписано в печать 20.07.2024

Тираж 300 экз.

Зарегистрирован ISSN 2413–1806 в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций. Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77- 60016 от 21 ноября 2014 г.
Материалы журнала размещаются на сайте Научной электронной
библиотеки и включаются в национальную
информационно-аналитическую систему РИНЦ

СОДЕРЖАНИЕ

К ЮБИЛЕЮ (50 лет) ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Уроки истории военной метрологии 3

Общие вопросы метрологии

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

Минобороны России,

Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Обоснование требований к достоверности поверки средств
измерений (измерительных каналов измерительных
систем), применяемых для комплектации разрабатываемого
технического объекта 6

Тупицина А.В., ФГБУ «ВНИИР»,

Метрологический диагностический контроль масс-
спектрометрических анализаторов влажности в процессе
испытаний микросхем в герметичных корпусах. проблемы и
решения 8

Стяжкин В.А., к.т.н., научно-технический комитет
(Метрологической службы ВС РФ), базовая кафедра
Технологического университета;

Хайруллин Р.З., д.ф.м.н., МГТУ им. Н.Э.Баумана, Московский
государственный строительный университет, ФГБУ «ГНМЦ»
Минобороны России

Корреляция математической и эмпирической моделей поля
ионизирующих излучений дозиметрической установки
упд-интер 14

Измерения геометрических величин

Т. В. Колобашкина, доцент, кандидат технических наук, доцент;

Н.Н. Скориантов, доцент, кандидат технических наук, доцент;

Р. Н. Целмс, доцент, кандидат технических наук

М. А. Скоков, студент,

*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

Получение модельных аэрозолей для испытания
пылеизмерительной аппаратуры 20

Измерения электрических величин

Об особенностях средств измерений военного назначения

Ольховский А.Н., к.т.н., старший научный сотрудник, ФГБУ
«ГНМЦ» Минобороны России, Кувыкин Ю.А., к.т.н., старший
научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Щедрин А.Ю., младший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ»
Минобороны России

О реализации процедур метрологического самоконтроля
пьезоэлектрических вибропреобразователей с внутренним
возбуждением деформации чувствительных элементов на
месте их установки 24

Измерения параметров магнитного поля

Фокина Н.Н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Фокин А.П., к.т.н., ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора

Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Теоретические основы решения навигационной задачи
через непрерывное измерение вектора магнитной индукции
магнитного поля земли 35

Информация 40

VM 3/2024

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

«Vestnik Metrologa»

Scientific and technical journal

By the solution of VAK of 18.12.2017 it is
included in «The list of the reviewed
scientific
publications in which have to be the main
scientific results of theses for a degree of
the candidate of science, for a degree of the
doctor of science are published» («List»...
of 25.12.2022 for No. 2210).

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

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

The Editorial advice:

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

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

S.S. Golubev, candidate of the technical
sciences

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

Y.A. Kleymenov, doctor of the technical
sciences

D.A. Kuznetsov

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

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

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

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

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

Editor-in-chief

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

Deputy main of the editor

O.V. Nadeina, candidate of the pedagogical
sciences

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

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

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

(495) 586-23-88.

E-mail: 32gnii_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

To holiday FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense

Lessons to histories to military metrology 3

Common questions of a metrology

Khramenkov V.N., Doctor of Technical Sciences, Professor, FSBI

"MSHC" of the Ministry of Defense of Russia,

Nadeina O.V., c.p.s., FSBI "MSHC" of the Ministry of Defense of Russia

Justification of the requirements for the reliability of verification

of measuring instruments (measuring channels of measuring

systems) used to complete the technical object being developed 6

Tupitsina A.V., FSBI «VNIIR»

Method of increasing to accuracy of the measurements parameter

under development technical object Metrological diagnostic control

mass spectrometric humidity analyzers in the process of testing

microcircuits in impermeable cases. problems and solutions 8

Styazhkin V.A., c.t.s., Scientific and Technical Committee

(Metrological Service of the Armed Forces of the Russian

Federation), Basic Department of the Technological University;

Khayrullin R.Z., d.ph.-m.s., Bauman Moscow State Technical

University, Moscow State University of Civil Engineering, FSBI

«MSHC» of Ministry of Defense of Russia

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

Correlation of mathematical and empirical models of the ionizing

radiation field of the upd-inter dosimetric installation 14

Measurements of the mechanical values

T. V. Kolobashkina, k.t.s., Associate Professor;

N.N. Skorientov, k.t.s., Associate Professor;

R. N. Tselms, k.t.s., Associate Professor;

M. A. Skokov, Student

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Obtaining model aerosols for testing dust measuring equipment 20

Measurements of the electric values

Olkhovskiy A.N., c.t.s., senior researcher, FSBI «MSHC» of Russia
Ministry of Defense,

Kuvykin Yu.A., c.t.s., senior researcher, FSBI «MSHC» of Russia

Ministry of Defense;

Shchedrin A.Yu., junior researcher, FSBI «MSHC» of Russia

Ministry of Defense;

On the implementation of procedures for metrological self-

monitoring of piezoelectric vibration transducers with internal

excitation of deformation of sensitive elements at their

installation site 24

Measurements parameter magnetic field

Fokina N.N., FSBI «MSHC» of the Russian Federation Ministry of Defense;

Fokin A.P., Military and Air academy of Zhukovsky and Gagarin

(VUNTs Air Force «VVA»)

Theoretical foundations of solving the navigation problem through

continuous measurement of the magnetic induction vector of the

earth's magnetic field 35

INFORMATION 40

УРОКИ ИСТОРИИ ВОЕННОЙ МЕТРОЛОГИИ 1944–2024 ГОДЫ

(Воспоминания Начальника метрологической службы Военно-воздушных сил (1973–1988гг.), заведующего музеем военной метрологии Межвидового центра метрологии Минобороны РФ полковника в отставке В.Е. Фоменко)

За 80 лет функционирования военной метрологии Советского Союза и Российской Федерации мне посчастливилось служить и работать в метрологических органах Военно-воздушных сил более 60 лет.

Изучив подлинные исторические материалы первой военной метрологической структуры Красной Армии в Центральном архиве Министерства обороны РФ и будучи заведующим музеем военной метрологии Межвидового Центра метрологии Минобороны РФ, мне удалось собрать и обобщить материалы о деятельности военной метрологии за 80 лет.

Поэтому я могу судить о реальных событиях, в которых сам принимал участие, а также был свидетелем многих других событий в жизни военной метрологии.

Хочу рассказать о некоторых уроках и ошибках в жизни нашей службы на примере, в основном, ВВС, но и не только.

1 урок.

Ещё в 60-х годах прошлого столетия у командования объединений и начальников служб военного ведомства было весьма настороженное и неуважительное отношение к достоверному приборному контролю характеристик авиационной техники. Путались весьма схожие понятия «метрология» и «метеорология». Поэтому руководствуясь принципом военных метрологов времен Великой Отечественной войны 1941–1945 годов «Сначала научи, а потом потребуй» было принято решение рассказать и доказать значимость военной метрологии в повседневной деятельности войск и сил флота и обеспечении их боеготовности. В средствах массовой информации по этому вопросу выступили авторитетные руководители и начальники авиационных объединений, были написаны статьи в средствах массовой информации. В 1968 г. заместитель командующего воздушной армии Прикарпатского военного округа, заслуженный военный лётчик СССР, генерал-майор авиации Микоян А.А. выступил в газете «Красная Звезда» со статьей

«От эталона к самолету», в которой положительно оценил деятельность авиационных метрологов в поддержании боеготовности авиационной техники и обеспечения безопасности полетов. В мае 1972 г. командующий воздушной армии Прикарпатского военного округа заслуженный военный летчик СССР генерал-лейтенант авиации Горелов С.Д. выступил в газете «Красная Звезда» со статьей «На службе точных измерений». На конкретных примерах он показал ошибочность мнения части специалистов, что измерительный контроль – дело второстепенное. Он предупредил, что подготовка техники к полетам или проведение регламентных работ «на глазок» может привести к непредсказуемым последствиям и даже к срыву выполнения учебных и боевых задач. С созданием в 1974 году Метрологической службы СССР пропаганда метрологических знаний среди личного состава армии и флота приобрела еще большее значение. Поэтому в периодической печати, в газете «Красная Звезда», в передовицах разных газет и журналах стали печататься материалы, в которых убедительно доказывалась важная роль достоверных измерений при подготовке техники и вооружения к применению. Руководители высшего звена Министерства обороны СССР генерал армии Алексеев Н.Н., генерал-полковник-инженер Покровский Р.П., Главный маршал авиации Кутахов П.С. отмечали, что сегодня насыщенность Вооруженных Сил техникой такова, что высокий уровень технической грамотности личного состава превратился сейчас в один из основных показателей боевой готовности войск. Практически каждый военный специалист ежедневно сталкивается с необходимостью проводить те или иные измерения. Поэтому всем необходима метрологическая культура, культура измерений. Постепенно все становилось на свои места, со временем военные метрологи заняли свою нишу в деятельности войск наравне с другими службами.

Из-за такого недопонимания даже на более высоком уровне правительства была сделана ошибка: из двух знаков «Заслуженный метролог РФ» и «За-

служенный метеоролог РФ» там решили, что двух знаков одной службе много и знак «Заслуженный метролог РФ» отменили.

Вывод: Везде, на всех уровнях надо показывать и доказывать значимость и практическую пользу военной метрологии, требовать безусловного соблюдения единства и достоверности измерений в повседневной деятельности войск и сил флота, гарантирующее боеготовность вооружения и военной техники

2 урок.

В 1980г. в военных округах был проведен эксперимент по централизации метрологических структур военных округов. Приказом Министра обороны СССР две метрологические службы Сухопутных войск и Военно-воздушных сил были объединены в одну. Начальник метрологического отделения – Главный метролог авиационного объединения был назначен заместителем начальника метрологической службы военного округа. Что получилось? Авиационные метрологи стали привлекаться к проведению метрологического надзора и проводить проверку рабочих приборов частей Сухопутных войск, что, естественно, ослабило метрологическое обслуживание авиационной техники в ущерб её боеготовности. В результате авиационные метрологи стали терять свою специфическую квалификацию. Вследствие этого вопросам надлежащего контроля за состоянием приборного парка авиационных частей стало уделяться значительно меньше внимания. На третьем году такой «работы» командующие авиационных объединений обратились в Министерство обороны с просьбой вернуть авиационных метрологов назад.

В 1983г. авиационные метрологи были возвращены в структуру ВВС, а эксперимент был признан неудачным.

Вывод: Каждый вид Вооруженных Сил имеет свою специфику и только специально подготовленные поверители и ремонтники вида Вооруженных Сил могут учитывать и грамотно использовать специальные средства измерений, составляющие более половины парка рабочих приборов воинских частей. Поэтому ликвидация метрологических структур видов Вооруженных Сил была ошибкой.

3 урок.

В переходной период 1990-х годов прошлого столетия была неправильно определена техническая политика по отношению к вооружению и военной технике. Было принято решение изымать из эксплуатации у воинских частей рабочие приборы и везти

их на поверку в стационар лабораторий и баз измерительной техники. Из штатов лаборатории измерительной техники (ЛИТ) были исключены подвижные поверочные средства. Что получилось? Ломать десятилетиями сложившуюся систему метрологического обслуживания войск никому и в голову не приходило. А как быть? Предложенный в те годы модный «аутсорсинг» себя не оправдывал, имея узко определенные рамки деятельности, не удовлетворяющие потребности войск. Приходилось просить командиров воинских частей присылать свой автотранспорт в лабораторию для перевозки приборов к месту поверки. И что вообще дико – даже приходилось ездить на личных автомобилях с приборами в гарнизоны. Конечно, со временем ошибка была исправлена.

Вывод: основная работа военных метрологов должна проводиться в интересах войск и, в основном, на местах эксплуатации вооружения и военной техники. Следует активно развивать и максимально использовать подвижные поверочные средства, оборудованные на автомобилях, в железнодорожных вагонах, летающие и плавающие. Авторитет метрологической службы от этого только вырастет.

4 урок

Инспекторские проверки войск выявили недостаточно высокую культуру измерений специалистами воинских частей. Они плохо знали приборы, зачастую не умели грамотно их применять, техническое обслуживание приборов не делалось вообще. В ВВС принимались разовые меры, создавались нештатные комиссии по надзору за парком рабочих приборов в авиационных гарнизонах, но должного эффекта это не приносило.

В 1976 г. начальник метрологической службы воздушной армии Ленинградского военного округа подполковник Рычков В.П. выступил с почином о проведении единого целевого дня метрологии в авиационном гарнизоне. В этот день все внимание уделялось только состоянию рабочих приборов и умению правильной работы с ними. С участием должностных лиц метрологической службы проводились следующие мероприятия: показ специалистам служб авиационных частей правильной работы с приборами, их правильное техническое обслуживание и заполнение документации, изучение новых приборов. Этот почин был поддержан Главнокомандующим ВВС, который на шифровке командующего воздушной армии написал «Молодцы ленинградцы! Так держать!» В итоге единые целевые дни метрологии стали проводиться регулярно во всех частях ВВС два раза в год – при переводе

авиационной техники на зимнюю и летнюю эксплуатацию. Такой порядок был зафиксирован в руководящих и нормативных документах всех служб. Результаты последующих проведенных проверок показали, что состояние парка рабочих средств измерений значительно улучшилось.

Вывод: для улучшения содержания измерительной техники и повышения достоверности измерений, привития личному составу войск культуры измерений было бы целесообразно внедрить единые целевые дни метрологии в повседневную жизнь войск и сил флота.

5 Урок

Наша подчиненность. Мы родились в службе Тыла и за это ей спасибо. Но за 80 лет мы побывали в подчинении у трех разных начальников: начальника тыла, начальника вооружения и начальника штаба. Конечно, везде были свои плюсы и минусы. Но окончательное суждение об эффективности подчинения можно получить только по конечным результатам работы.

Как известно, средства измерений применяют все службы. Чтобы решать общие вопросы метрологического обеспечения войск надо давать указание всем службам, а такое право имеет только командующий и начальник штаба объединения. При любом другом подчинении (тылу, вооружению) такое указание войскам приходится давать через начальника штаба.

Как показывает исторический опыт ВВС, именно при подчинении начальнику штаба была достигнута наибольшая эффективность работы метрологической службы. Именно при таком подчинении мы стали участвовать в оперативных мероприятиях, в проведении командно-штабных учений. Именно при таком подчинении значительно повышалась боеготовность войск, так как объем поверочных и ремонтных работ на местах дислокации войск удалось довести до 90–95%. А произошло это потому, что при таком подчинении не было проблем с полнотой метрологического обслуживания войск. Исходя из имеющегося парка рабочих приборов авиационного объединения можно было иметь необходимое количество поверителей за счет их подготовки из числа солдат срочной службы. Кроме того, не было проблем с лимитом пробега специальных автомобилей и требуемого количества горючего. Налицо явная польза такого подчинения, ввиду полноты метрологического обслуживания вооружения и военной техники на местах дислокации войск.

Вывод: Наибольшая эффективность работы службы была достигнута при подчинении начальнику штаба и, как показала жизнь, – она была наиболее оперативной и оптимальной.

6 Урок

В настоящее время, по-моему мнению, назрела необходимость усилить метрологическую подготовку кадров для метрологической службы и других служб Вооруженных Сил России. В настоящее время кафедры метрологии функционируют в 3-х академиях (г. Санкт-Петербург, г. Воронеж и г. Балашиха Московской области). В Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина кафедра метрологии создана на факультете метеорологической службы. Мы же своего факультета не имеем. Тем более, что в современных условиях метрология – это не просто наука об измерениях, а фундаментальная наука в своей области. Это наглядно и объективно подтверждается боевыми действиями в СВО, когда требуется повышенная, можно сказать «ювелирная» точность попадания в цель ракетами, бомбами и артиллерийскими снарядами. А значит и нужен самый серьезный подход к подготовке специалистов, умеющих грамотно и достоверно работать с измерительной техникой, обладающих высокой метрологической культурой.

Вывод: Предлагаю подумать о создании факультета военной метрологии.

В заключении хочу сказать, что на сегодняшний день издано два исторических труда по военной метрологии:

- исторический очерк Фоменко В.Е. «Метрологическая служба Военно-воздушных сил», 2016 г.
- Книга «История военной метрологии», коллективом специалистов Главного научного метрологического центра Минобороны РФ, 2019 г.

На этом изучение истории военной метрологии не заканчивается. В изданных трудах очень мало использовано подлинных архивных материалов. Хочется, чтобы изучение истории военной метрологии в архивных организациях продолжилось. Обращаюсь к неравнодушным людям и энтузиастам нашей службы, которые пожелают продолжить изучение истории военной метрологии по архивным документам. Я же пока могу ознакомить таких желающих с уже имеющимися у меня архивными документами.

31 мая 2024г.

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ДОСТОВЕРНОСТИ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ (ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ), ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦИИ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

MOTIVATION OF THE REQUIREMENTS TO VALIDITY OF THE CHECK OF THE FACILITIES OF THE MEASUREMENTS (MEASURING CHANNEL OF THE MEASURING SYSTEMS), APPLICABLE FOR COMPLETING THE UNDER DEVELOPMENT TECHNICAL OBJECT

Храменков В.Н., д.т.н., профессор, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,

Khramenkov V.N., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense,
Nadeina O.V., k.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 рассмотрен метод обоснования требований к достоверности поверки средств измерений, применяемых для комплектации разрабатываемого технического объекта. Показано, что поверкой средства измерений обеспечивается прослеживаемость, заключающаяся в документально подтвержденном установлении его связи с соответствующим эталоном единицы величины и (или) государственным первичным эталоном единицы величины. Достоверность поверки средств измерений оценивается безусловными вероятностями ложного и необнаруженного отказов, от значений которых зависит готовность средства измерений к применению.

The Abstract. Method of the motivation of the requirements is considered in article to validity of the check of the facilities of the measurements, applicable for completing the under development technical object. It Is Shown by that check of the facility of the measurements is provided traceability, concluding in documentary confirmed determination his(its) relationship with corresponding to standard of the unit of the value and (or) by state primary standard of the unit of the value. Validity of the check of the facilities of the measurements is valued unconditional probability false and undetected refusal, from importances which depends readiness of the facility of the measurements to using.

Ключевые слова: достоверность поверки, средства измерений, прослеживаемость, эталон единицы величины, вероятность ложного отказа, вероятность необнаруженного отказа

Keywords: validity of the check, facility of the measurements, traceability, standard of the unit of the value, probability of the false refusal, probability of the undetected refusal.

Поверка средства измерений согласно [1] должна проводиться с периодичностью, устанавливаемой интервалом между поверками при проведении его испытаний для целей утверждения типа, с применением соответствующего рабочего эталона единицы величины, исходя из обеспечения заданного коэффициента готовности средства измерений к применению согласно [2].

Как установлено в [3], достоверность поверки средства измерений оценивается следующими показателями:

- безусловной вероятностью того, что средство измерений, соответствующее требованиям, установленным в методике его поверки, признается несоответствующим установленным требованиям (вероятность ложного отказа $P_{\text{ло}}$);

- безусловной вероятностью того, что средство измерений, не соответствующее требованиям, установленным в методике его поверки, признается соответствующим установленным требованиям (вероятность необнаруженного отказа $P_{\text{но}}$).

Исходными данными для обоснования требований к достоверности поверки средства измерений являются:

- заданное значение интервала между поверками средств измерений, которое должно согласно [2] соответствовать периодичности технического обслуживания технического объекта;

- заданное значение коэффициента готовности средства измерений к применению, которое должно устанавливаться в техническом задании на опытно-конструкторскую работу по созданию технического объекта в разделе «Требования к метрологическому обеспечению» согласно [2].

Значение коэффициента готовности средства измерений, входящего в состав технического объекта, определяется согласно [3] по формуле 1:

$$K_T = [1 - \exp(-\lambda T_K)] / \left\{ \left[\frac{\lambda T_K}{1 - \beta_K} + \exp(-\lambda T_K) \right] [1 - \exp(-\lambda T_K)] + \right. \\ \left. + \lambda t_K \left[\frac{1 - \exp(-\lambda T_K)}{1 - \beta_K} \beta_K + 1 \right] + [1 - \exp(-\lambda T_K)] (1 - \alpha_K) \lambda t_B \right\}, \quad (1)$$

где:

T_k – длительность интервала между поверками средства измерений;

t_k – продолжительность поверки средства измерений;

t_b – продолжительность восстановления (или замены) средства измерений;

λ – интенсивность скрытых отказов средства измерений;

α_k – условная вероятность ложного отказа средства измерений при его поверке;

β_k – условная вероятность необнаруженного отказа средства измерений при его поверке.

Значения условных вероятностей ложного α_k и необнаруженного отказов β_k средства измерений определяются по формулам (2) и (3) соответственно:

$$\alpha_k = P_{\text{ло}} / \int_{x_n}^{x_b} f(x) dx, \quad (2)$$

$$\beta_k = P_{\text{но}} / (\int_{-\infty}^{x_n} f(x) dx + \int_{x_b}^{\infty} f(x) dx). \quad (3)$$

где:

$$P_{\text{ло}} = \int_{x_n}^{x_b} f(x) \left[\int_{-\infty}^{y_n-x} f(y) dy + \int_{y_b-x}^{\infty} f(y) dy \right] dx, \quad (4)$$

$$P_{\text{но}} = \int_{-\infty}^{x_n} f(x) \left[\int_{y_n-x}^{y_b-x} f(y) dy \right] dx + \int_{x_b}^{\infty} f(x) \left[\int_{y_n-x}^{y_b-x} f(y) dy \right] dx. \quad (5)$$

В формулах (2) – (5) обозначено:

$f(x)$ – плотность распределения параметра x поверяемого средства измерений;

x_b, x_n – верхнее и нижнее предельно допустимые значения параметра x поверяемого средства измерений;

$f(y)$ – плотность распределения вероятности погрешности y рабочего эталона, применяемого при поверке средства измерений;

y_b, y_n – верхнее и нижнее предельно допустимые значения погрешности рабочего эталона, применяемого при поверке средства измерений, входящего в состав технического объекта.

В случае, когда для подтверждения соответствия средства измерений установленным требованиям при поверке измеряется n его параметров, вероятности ложного α_k и необнаруженного β_k отказов при поверке средства измерений определяются по формулам:

$$\alpha_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \alpha_k), \quad (6)$$

$$\beta_p = \left\{ \prod_{k=1}^n [P_{ok}(1 - \alpha_k) + (1 - P_{ok})\beta_k] - \prod_{k=1}^n P_{ok}(1 - \alpha_k) \right\} \times [1 - \prod_{k=1}^n P_{ok}]^{-1}, \quad (7)$$

где:

α_k и β_k – условные вероятности ложного и необнаруженного отказов по k -му контролируемому при поверке параметру средства измерений соответственно;

P_{ok} – вероятность отсутствия отказа средства измерений по i -му контролируемому параметру при его поверке;

n – число контролируемых параметров средства измерений при его поверке.

Алгоритм обоснования требуемых значений показателей достоверности поверки средства измерений из состава разрабатываемого технического объекта включает следующие операции:

– устанавливаются на основе сведений о прототипах технического объекта предварительные значения вероятностей α_k и β_k . Затем для заданного в подразделе «Требования к метрологическому обеспечению» ТЗ на ОКР по созданию технического объекта значения коэффициента готовности средства измерений $K_{Г_{mp}}$, а также значений T_k, t_k, t_b, λ и установленных предварительных значений вероятностей α_k и β_k определяется по формуле (1) значение $K_{Г_p}$;

– полученное по формуле (1) значение коэффициента готовности средства измерений $K_{Г_p}$ сравнивается со значением $K_{Г_{mp}}$, заданным в ТЗ на ОКР по созданию технического объекта согласно [4];

– если значение $K_{Г_p}$ окажется меньше значения $K_{Г_{mp}}$, предварительные значения вероятностей ложного α_k и необнаруженного β_k отказов при поверке средства измерений необходимо уменьшить, и повторить процедуру;

– когда значение $K_{Г_p}$ окажется равным или незначительно больше значения $K_{Г_{mp}}$, полученные при этих условиях значения вероятностей ложного α_k и необнаруженного β_k отказов при поверке СИ включаются в состав обязательных метрологических требований в ТЗ на ОКР по созданию технического объекта.

Литература

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями и дополнениями от 14 февраля 2024 г. Федерального закона № 18-ФЗ).
2. ГОСТ 15.016-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению.
3. РМГ 74-2004. Рекомендация по межгосударственной стандартизации. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРОВ ВЛАЖНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ МИКРОСХЕМ В ГЕРМЕТИЧНЫХ КОРПУСАХ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ
METROLOGICAL DIAGNOSTIC CONTROL MASS SPECTROMETRIC HUMIDITY ANALYZERS IN THE PROCESS OF TESTING MICROCIRCUITS IN IMPERMEABLE CASES. PROBLEMS AND SOLUTIONS

Тупицина А.В., ФГБУ «ВНИИР»,
Tupitsina A.V., FSBI «VNIIR»
+7(495)586-17-21 (1408), nazarkina@vniir-m.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос повышения точности измерения паров влаги под корпусом микросхем масс-спектрометрическими анализаторами путем введения дополнительного калибровочного коэффициента, учитывающего аппаратную погрешность используемых средств измерений. Показана возможность внедрения предлагаемой методики метрологического диагностического контроля анализаторов влажности различных типов в рабочих условиях.

Annotation. The article discusses the question increasing measurement accuracy of moisture vapor under the microcircuit cases with mass spectrometric analyzers by introducing an additional calibration coefficient, considering the instrument fault of the measuring instruments used. The possibility of shown implementation proposed methodologies of metrological diagnostic control of moisture analyzers various types in working conditions.

Ключевые слова: измерение, микросхема, герметичность корпуса, влага, метрологическое обеспечение, средство измерений, масс-спектрометрический анализатор влажности, паспортизованная калибровочная капсула.

Keywords: measurement, microcircuit, impermeability of case, humidity, metrological support, measuring instrument, mass spectrometric humidity analyzers, attested calibration capsule.

Введение

В процессе создания перспективных образцов микросхем (далее – МС) нового поколения проводятся многочисленные высокоточные измерения, объем которых занимает до 40–50 % трудоемкости и длительности общего процесса разработки. При этом последствиями некачественно выполненных измерений являются не только увеличение сроков и затрат на разработку МС, но и снижение надежности и безотказности изделий.

Проведение параметрического контроля современных МС, учитывая сложность их устройства, не может подтверждать отсутствие внутренних скрытых дефектов, величина которых может меняться в изделии в течение времени при различных условиях эксплуатации. Влага в подкорпусном пространстве МС является одним из таких проблемных параметров, требующих анализа [1, 2].

Функциональность многих типов электронных устройств зависит от защиты, обеспечиваемой герметичным корпусом, незначительное количество любых ненасыщенных паров внутри которого ухудшает качество работы изделия. Это явление, открытое и исследуемое последние четырнадцать лет, имеет большое значение, особенно в сфере космического ракетостроения.

Пары, адсорбенты или конденсаты влаги, водорода, кислорода, углеводорода, аммиака и пр.

в свободном пространстве корпуса МС создают внутри уникальную среду, а воздействие температурных, механических или химических факторов при эксплуатации устройств в экстремальных условиях могут вызвать или усугубить и без того агрессивную мини-атмосферу в подкорпусном пространстве изделия. Обеспечение низкого содержания летучих веществ гарантирует более высокую надежность (уменьшение электрического тока утечки), сохраняемость (отсутствие дендритного роста кристалла) и долговечность (снижение риска коррозии) МС. Решение данной проблемы существенно повлияет на уровень научного, экономического и военного потенциалов в различных отраслях промышленности.

Наиболее точным способом определения количества частиц влаги в МС является метод разрушающего контроля: внешняя часть изделия высушивается при высокой температуре, после чего ее корпус прокалывается и методом масс-спектрометрии определяется ppm (количество объемной влаги в подкорпусном пространстве МС). При подозрении на неисправности полный количественный анализ внутренних газов в подкорпусном пространстве может не только подтвердить наличие повышенной внутренней влажности, но и предоставить важную информацию об источнике влаги или других потенциально агрессивных га-

зах. Данный метод заложен в принципе действия анализаторов влажности и газа, используемых для измерений молярной (объемной) доли вещества.

На сегодняшний день существует острая необходимость разработки и внедрения единого метрологического подхода к определению концентрации паров влаги внутри корпусов МС, способного обеспечить сходимость и воспроизводимость результатов проводимых исследований независимо от выбранного средства измерений (далее – СИ).

Основная часть

Современная масс-спектрометрия – один из точнейших (и наиболее дорогих) методов анализа, который отличается самыми низкими пределами идентификации и определения количественного состава летучих веществ в подкорпусном пространстве МС, что позволяет получить общее представление о внутренней атмосфере изделия.

Главное отличие масс-спектрометрии от других методов физико-химического анализа заключается в том, что определяются непосредственно частицы вещества, а не излучение или поглощение энергии атомами или молекулами. В основе метода лежит измерение отношения массы иона к его заряду.

В настоящее время на предприятиях радиоэлектронной отрасли для анализа содержания паров влаги под корпусом МС используется различное оборудование:

- отечественный анализатор влажности МКМ-1, регистрационный номер в реестре Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (далее – ОЕИ) № 53684–13;
- зарубежный анализатор газов EDA-407, регистрационный номер в реестре Федерального информационного фонда по ОЕИ № 71948–18.

Работа масс-спектрометров, независимо от типа, построена на едином принципе, поэтому исследование проводится по одинаковому двухстадийному алгоритму: исследуемая МС помещается в шлюзовую камеру СИ и после откачки до высокого вакуума перемещается в камеру вскрытия, в которой находится источник ионизации. По достижении необходимого уровня давления паров (в зависимости от размеров образца и от его качества атмосферной дегидратации) прокалывающее устройство создает микротечь в корпусе МС, через которое парогазовая смесь попадает в область ионизации заранее рассчитанным потоком, опре-

деляемым величиной образовавшегося отверстия и скоростью откачки вакуумного насоса.

Основные операции выполнения работы анализатора влажности и газа представлены на схеме (рисунок 1).

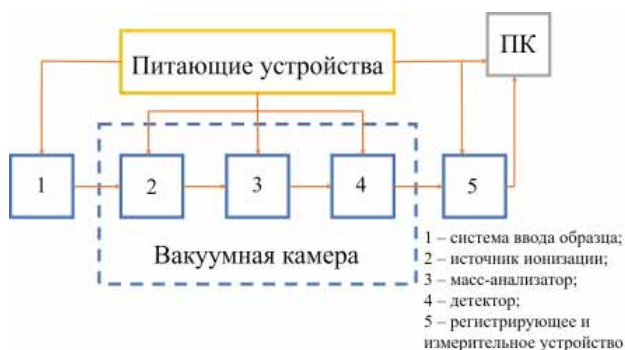


Рисунок 1 – Схема проведения измерений масс-спектрометром

В целях контроля возникновения деградиционных процессов внутри МС в различных организациях проводились сличительные испытания по определению концентрации паров влаги под корпусом изделий, при которых неоднократно были получены существенно отличающиеся результаты (рисунок 2 и 3). Важно отметить, что расхождения результатов исследований, превышающих допустимые значения концентрации паров влаги, имеются даже при минимальных изменяющихся факторах: измерения параметров МС из одной партии выполнялись на однотипном СИ предприятием-разработчиком и потребителем изделия, – но показатели последовательно выполненных измерений варьируются (как увеличиваются, так и уменьшаются) вне зависимости от порядка проведения исследования.

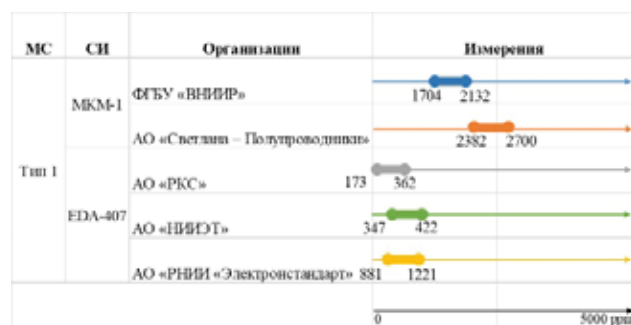


Рисунок 2 – Результаты исследований по контролю влаги в подкорпусном пространстве МС (тип 1)

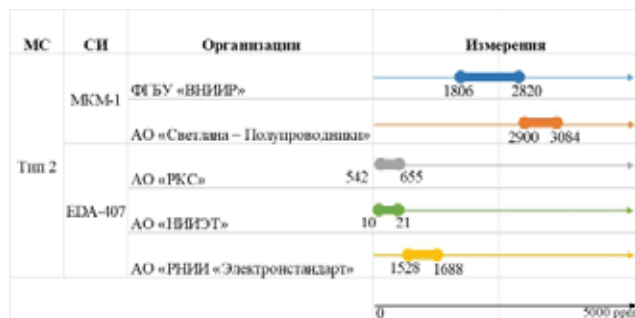


Рисунок 3 – Результаты исследований по контролю влаги в подкорпусном пространстве МС (тип 2)

Результаты исследований показали, что в процессе измерений содержания влаги в подкорпусном пространстве однотипных МС любыми типами задействованных СИ присутствует неучтенная аппаратурная погрешность.

Точность измерения используемых СИ должна обеспечиваться качеством их поверки. Проведение поверки СИ при осуществлении метрологического обеспечения испытаний регламентировано основополагающими нормативными документами по ОЕИ [3, 4].

Однако процесс измерения содержания влаги внутри герметичного корпуса МС и измерение напускаемой в камеру газовой смеси при поверке анализаторов отличны друг от друга механизмами подачи пробы. В процессе испытаний при накаливании корпуса МС в камеру СИ поступает ограниченный объем (малый по сравнению с объемом камеры СИ) анализируемой парогазовой смеси. В ходе измерения с использованием внешней парогазовой смеси при поверке масс-спектрометрического анализатора происходит длительный контролируемый напуск данной смеси в камеру. Таким образом, объем смеси, прошедший через камеру прибора, на порядок больше объема смеси, напускаемой из корпуса испытываемого изделия. Обеспечить точное дозирование внешней пробы в камеру анализатора влажности, которая будет соизмерима с объемом подкорпусного пространства МС, технически невозможно без искажения свойств пробы.

Очевидно, что операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия СИ метрологическим характеристикам на основании утвержденных методик поверки [5] и [6], недостаточно. Причина получения различных итогов проведения сличительных испытаний МС связана с отсутствием метрологической прослеживаемости от эталона влаги ГЭТ 151–2020 к испытываемым образцам изделий: в настоящее время

поверочные газовые смеси из-за неспособности обладать гарантированным содержанием объемной доли влаги не позволяют провести достоверные измерения между разными СИ с соблюдением процедур, выполняемых при испытаниях МС.

Возможность приведения к сходимости и воспроизводимости результатов сличительных испытаний МС одного типа может быть обеспечена внедрением метрологического диагностического контроля с применением меры величины влаги – паспортизованными калибровочными капсулами с заведомо известным содержанием молярной (объемной) доли влаги в конструктивном исполнении, аналогичном МС.

Предлагаемый метод передачи размера единицы величины влаги от государственного эталона рабочим масс-спектрометрическим анализаторам влажности устранил многоступенчатость поверочной схемы, так как ОЕИ параметров МС посредством паспортизованных калибровочных капсул предполагает их использование в узком диапазоне изменений влияющих величин в нормальных условиях. Такое положение накладывает ограничение на использование стационарного эталона и ведет к необходимости создания переносного, что сопровождается неизбежными погрешностями технологического характера.

Более того, проведение метрологического диагностического контроля анализаторов влажности в процессе испытаний МС в герметичных корпусах методом замещения обеспечит перенос размера единицы измеряемой величины с учетом конкретных условий измерений при испытаниях, а не приписанного номинального значения эталона, поверенного в условиях нормальной области с иным сочетанием совокупности влияющих величин.

Паспортизованные метрологические характеристики калибровочных капсул позволят определить и исключить из результатов измерений аппаратурную погрешность на различных типах анализаторов влажности и газа. Создание взаимосвязи системы поверки и эксплуатационной системы будет обеспечивать метрологическую прослеживаемость, что абсолютно необходимо для оптимальных исследований, разработки или надежности процесса.

Необходимость определения аппаратурной погрешности анализаторов влажности и газа в конкретных условиях эксплуатации предполагает на первом этапе метрологического диагностического контроля при заданных условиях установить

соотношение величин с неопределенностью измерений, которые обеспечивают эталоны, и с соответствующими показаниями с присущими им неопределенностями измерений СИ. На основе полученной информации на втором этапе устанавливается соотношение, позволяющее исключить погрешность измерения в установленных условиях эксплуатации и получить корректные результаты измерения.

В довершение, следует обратить внимание, что контроль характеристик измерений является неотъемлемым условием к обеспечению качественного проведения испытаний. На сегодняшний момент применяют два основных метода для определения и выражения точности измерений.

В традиционном подходе, говоря об оценивании погрешности, как разности между результатом измерений и истинным значением измеря-

емой величины, подразумевают оценивание ее характеристик, что разъясняется в [7].

Относительно новый подход базируется на понятии неопределенности измерений, изложенном в [8]. Неопределенность измерения выражает тот факт, что для измеряемой величины и результата ее измерения нет единственного значения, а есть интервал значений, где находится искомый результат измерений, который с учетом достаточно надежной апостериорной информации согласуется с имеющимися данными и с различной степенью уверенности может быть приписан измеряемой величине [9].

В таблицах 1 и 2 представлены оценки неопределенности измерений на каждое измеренное значение по результатам исследований влаги в подкорпусном пространстве изготовленных образцов МС типа 1 и 2, проведенных в нормальных климатических условиях.

Таблица 1

Расчет неопределенности измерений МС (тип 1)

Наименование	№ измерения	Измеренное значение	Составляющая неопределенности по типу A, U_A	Составляющая неопределенности по типу B, U_B	Коэффициент чувствительности		Суммарная стандартная неопределенность измерений, U_C	Расширенная неопределенность измерений, U , при $k=2$	$Y = y \pm U$ при $p = 0,95$	Вклад в суммарную неопределенность случайного характера, D_A	Вклад в суммарную неопределенность систематического характера, D_B
					для косвенных измерений, C_{DE}	для прямых измерений, C_I					
ФГБУ «ВНИИР»	1	1704	0,50	2,054	- 2,05	1	4,249	8,499	1704 $\pm 8,5$	1,38 %	98,62 %
	2	2132	0,50	2,548	- 2,55	1	6,514	13,03	2132 ± 13	0,58 %	99,41 %
АО «Светлана – Полупроводники»	1	2382	1,50	2,837	- 2,84	1	8,188	16,38	2382 ± 16	3,35 %	96,65 %
	2	2700	0,50	3,204	- 3,2	1	10,28	20,56	2700 ± 21	0,23 %	99,76 %
АО «Российские космические системы»	1	173	0,03	0,286	- 0,29	1	0,086	0,171	173 $\pm 0,2$	8,51 %	91,49 %
	2	362	0,01	0,505	- 0,5	1	0,255	0,51	362 $\pm 0,5$	0,15 %	99,84 %
АО «РНИИ «Электрон-стандарт»	1	881	0,50	1,104	- 1,1	1	1,317	2,634	881 $\pm 2,6$	14,41 %	85,59 %
	2	1221	1,00	1,496	- 1,5	1	2,453	4,905	1221 $\pm 4,9$	16,62 %	83,37 %
АО «НИИЭТ»	1	347	0,03	0,487	- 0,49	1	0,239	0,479	347 $\pm 0,5$	1,57 %	98,42 %
	2	422	0,03	0,574	- 0,57	1	0,33	0,661	422 $\pm 0,7$	0,57 %	99,42 %

Расчет неопределенности измерений МС (тип 2)

Наименование	№ измерения	Измеренное значение	Составляющая неопределенности по типу A, U_A	Составляющая неопределенности по типу B, U_B	Коэффициент чувствительности		Суммарная стандартная неопределенность измерений, U_C	Расширенная неопределенность измерений, U , при $k=2$	$Y = y \pm U$ при $p = 0,95$	Вклад в суммарную неопределенность случайного характера, DA	Вклад в суммарную неопределенность систематического характера, DB
					для косвенных измерений, $C_{\Delta E}$	для прямых измерений, C_i					
ФГБУ «ВНИИР»	1	2820	0,50	3,343	- 3,34	1	11,19	22,37	2820 ± 22	0,20 %	99,80 %
	2	1806	0,50	2,172	- 2,17	1	4,744	9,488	1806 $\pm 9,5$	1,11 %	98,88 %
АО «Светлана – Полупроводники»	1	3084	1,50	3,648	- 3,65	1	13,39	26,78	3084 ± 27	1,25 %	98,75 %
	2	2900	3,00	3,435	- 3,44	1	12,18	24,35	2900 ± 24	6,07 %	93,93 %
АО «Российские космические системы»	1	655	0,50	0,843	- 0,84	1	0,869	1,738	655 $\pm 1,7$	33,12 %	66,81 %
	2	542	0,50	0,712	- 0,71	1	0,712	1,425	542 $\pm 1,4$	49,25 %	50,75 %
АО «РНИИ «Электрон-стандарт»	1	1688	0,50	2,036	- 2,04	1	4,174	8,349	1688 $\pm 8,3$	1,44 %	98,56 %
	2	1528	0,50	1,851	- 1,85	1	3,462	6,925	1528 $\pm 6,9$	2,08 %	97,92 %
АО «НИИЭТ»	1	21	0,00	0,111	- 0,11	1	0,013	0,025	21 $\pm 0,025$	3,97 %	96,03 %
	2	10	0,00	0,098	- 0,1	1	0,01	0,02	10 $\pm 0,02$	6,31 %	93,69 %

На основе полученных расчетов неопределенности измерений с вероятностью $p = 0,95$ установлено, что влияние до 99,8 % на неопределенность измерений вносит вклад погрешности, имеющей систематический характер, большую часть которой в соответствии с расчетом неопределенности по типу B, U_B , составляет аппаратная погрешность СИ. Данную погрешность наиболее рационально можно определить и исключить из результатов измерений с применением паспортизованных калибровочных капсул.

Для реализации поставленной научно-технической задачи по ОЕИ в процессе метрологического

обеспечения испытаний МС необходимо осуществить ряд научно-методических, технических и организационных мероприятий, наиболее важным из которых является метрологический диагностический контроль.

Реализация метрологического диагностического контроля анализаторов влажности в рабочих условиях эксплуатации МС предполагает разработку:

- паспортизованных калибровочных капсул различного объема и с различным процентным содержанием паров влаги;
- установки для заполнения парогазовой смесью и герметизации калибровочных капсул;

– типовой программы и методики испытаний МС, включающую этап проведения метрологического диагностического контроля используемых анализаторов влажности различных типов с применением соответствующих паспортизованных калибровочных капсул.

Заключение

В целях сохранности характеристик МС и снижения отказов в течение срока службы изделий необходимо повысить точность и достоверность результатов измерений величины, характеризующей содержание влаги в подкорпусном пространстве, в процессе испытаний МС методом разрушающего контроля.

Анализ текущего метрологического обеспечения проведения испытаний МС показал отсутствие единого метрологического подхода к оборудованию и методикам испытаний (измерений) МС, что приводит к недостаточной сходимости и воспроизводимости результатов испытаний.

Предлагаемый в статье единый метрологический подход предполагает в соответствии с государственной поверочной схемой для масс-спектрометрических анализаторов влажности передачу значения величины влажности от государственного первичного эталона влажности газа ГЭТ 151–2020 рабочим СИ с контролируемой погрешностью с помощью изготовления мер для анализа содержания паров влаги с паспортизованным содержанием газовой среды – паспортизованных калибровочных капсул.

Проведение метрологического диагностического контроля используемого оборудования непосредственно перед каждой серией испытаний МС позволит обеспечить сходимость и воспроизводимость результатов измерений при проведении испытаний и перспективных научных исследований по контролю содержания сопутствующих газов, присутствующих в подкорпусном пространстве МС.

Список использованных источников

1. Серадзинов. А.П., Погосов Г.С., Подъяпольский Б.С., Злобин И.С. Контроль содержания паров воды в подкорпусном пространстве интегральных

микросхем, многокристалльных модулей и микросборок, исследование основных проблем и путей их решения // Научно-технический журнал Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2021. № 3. С. 8–11.

2. Быканов В.В., Есакова М.М., Тупицина А.В., Булгаков О.Ю. О некоторых проблемах обеспечения единства измерений анализаторов влажности // Научно-технический журнал Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2022. № 3. С. 25–27.

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

4. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 31 июля 2020 года № 2510 «Об утверждении Порядка проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке».

5. МП 212–241–2017. Государственная система обеспечения единства измерений. Анализаторы газа в электронных устройствах EDA 407. Методика поверки.

6. МП 242–1528–2020. Государственная система обеспечения единства измерений. Анализаторы влажности МКМ-1. Методика поверки.

7. МИ 1317–2004. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

8. ГОСТ 34100.1–3.2–2017. Неопределенность измерения. Часть 1–3.2. Руководство по выражению неопределенности измерения.

9. В. Быканов, М. Есакова, А. Тупицина. Измерения параметров ЭКБ. Концептуальные основы установления и реализации обязательных метрологических требований // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2022. № 10. С. 38–42.

КОРРЕЛЯЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ И ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ УПД-ИНТЕР CORRELATION OF MATHEMATICAL AND EMPIRICAL MODELS OF THE IONIZING RADIATION FIELD OF THE UPD-INTER DOSIMETRIC INSTALLATION

Стяжкин В.А., к.т.н., научно-технический комитет (Метрологической службы ВС РФ),
базовая кафедра Технологического университета;

Хайруллин Р.З., д.ф.-м.н., МГТУ им.Н.Э.Баумана, Московский государственный строительный университет,
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Styazhkin V.A., c.t.s., Scientific and Technical Committee (Metrological Service of the Armed Forces of the Russian Federation),
Basic Department of the Technological University;

Khayrullin R.Z., d.ph.-m.s., Bauman Moscow State Technical University, Moscow State University of Civil Engineering,
FSBI «MSHC» of Ministry of Defense of Russia
styazhkinva@yandex.ru, +7 (962) 994-89-64;
zrkzrk@list.ru, +7 (926) 405-22-17

Аннотация. Показана актуальность задачи повышения эффективности работ с источниками ионизирующих излучений за счёт моделирования поля ионизирующих излучений. Подтверждена корреляция математической модели поля ионизирующих излучений УПД-ИНТЕР, построенной на основе фундаментальных законов распространения фотонного излучения с учетом внешних влияющих факторов, и эмпирической модели установки, полученной в результате статистической обработки ретроспективных результатов измерений.

Annotation. The relevance of the task of increasing the efficiency of work with ionizing radiation sources by modeling the field of ionizing radiation is shown. The correlation of the mathematical model of the UPD-INTER ionizing radiation field, based on the fundamental laws of photon radiation propagation, taking into account external influencing factors, and the empirical model of the installation obtained as a result of statistical processing of retrospective measurement results, has been confirmed.

Ключевые слова: эталонные дозиметрические установки; поле ионизирующих излучений; математическая модель; эмпирическая модель.

Keywords: reference dosimetric installations; ionizing radiation field; mathematical model; empirical model.

Поверочные работы на эталонных дозиметрических установках типа УПД-ИНТЕР и их модификаций [1] сопряжены с воздействием радиационно-опасных факторов и подразумевают дозиметрические нагрузки на поверителей и обслуживающий персонал данных установок, что влечет за собой необходимость обеспечения нормативных требований радиационной безопасности. Поэтому задача повышения эффективности работ с источниками ионизирующих излучений всегда остается актуальной.

Одним из возможных направлений создания условий работ с минимальными рисками для здоровья человека при эксплуатации дозиметрических установок и выработке оптимальной стратегии управления ими может служить имитационное моделирование [2]. При этом основной принцип имитационного моделирования систем со стохастическими (вероятностными) элементами заключается в получении выборок по методу Монте-Карло с учётом влияния неконтролируемых случайных факторов.

Как известно, создавать и использовать имитационные модели с вероятностными элементами целесообразно лишь, когда случайные факторы полностью описаны с помощью соответствующих

характеристик (вероятность, плотность распределения вероятностей и т.п.). Эти характеристики изучаются на базе эмпирических данных, собранных либо при систематизации имеющихся отчётных материалов, либо в результате обработки специально поставленных экспериментов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Составляющие получения эффективной модели поля ионизирующих излучений

Предлагаемый подход подразумевает моделирование поля ионизирующих излучений, формируемого в дозиметрических установках УПД-ИНТЕР, путём определения аппроксимирующей функциональной зависимости всех статистически значимых параметров данного поля (выраженной в виде полинома n -го порядка) и применении её на практике, сократив большую часть натурных измерений, проводимых с помощью эталонного дозиметра. Блок-схема построения цифровой модели (ЦМ) УПД-ИНТЕР представлена на рисунке 2.

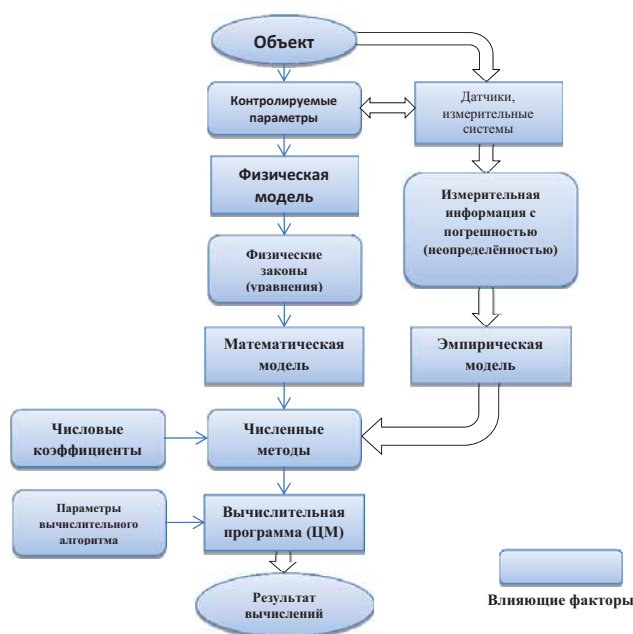


Рисунок 2 – Алгоритм построения модели эталонной дозиметрической установки типа УПД-ИНТЕР

Одним из условий реализации и адекватности предлагаемого подхода является проверка корреляции математической модели поля ионизирующих излучений УПД-ИНТЕР, построенной на основе фундаментальных законов распространения фотонного излучения с учетом внешних влияющих факторов, и эмпирической модели установки, полученной в результате статистической обработки ретроспективных результатов измерений и их интерпретации. При этом необходимо учитывать, что в установках УПД-ИНТЕР конструктивно обеспечена воспроизводимость строгих геометрических условий размещения источника фотонного излучения, ослабляющих фильтров и блоков детектирования, что позволяет сделать

предположение о неизменности характеристик поля ионизирующих излучений в заданных точках с течением времени (с учётом распада источника и суммарной погрешности измерений).

Построение математической модели поля ионизирующих излучений замкнутой дозиметрической установки в общем виде сводится к формированию неявной функции, отражающей зависимость взаимосвязанных величин, которые определяют формирование поля фотонного излучения в замкнутой системе установки:

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

где $\dot{X}$ – мощность дозы;

A – активность радионуклида в источнике;

R – расстояние от источника до центра детектора;

μ – коэффициент ослабления излучения в воздухе;

k_{ϕ} – кратность ослабления фильтров;

$\dot{X}_{\text{вт}}$ – мощность дозы сопутствующего вторичного излучения: рассеянные фотоны и электроны;

$\dot{X}_{\text{тор}}$ – мощность дозы сопутствующего тормозного излучения (наиболее характерно для бета-дозиметрии);

T, φ, p – метеорологические параметры окружающей среды (температура, влажность, давление);

Θ_{pp} – неисключённые систематические погрешности разного рода (средства, методы, различные коэффициенты и другие).

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

Учитывая совокупность вышеуказанных характеристик, влияющих факторов и их значений, в результате преобразования функции (1) получим математическую модель мощности дозы $\dot{X}$ в точке i , создаваемой точечным источником с активностью A на некотором расстоянии R_i от источника, который закрыт фильтром j :

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

Полученная математическая модель поля ионизирующих излучений дозиметрической установки, учитывающая влияние неконтролируемых случайных факторов, может служить априорной информацией при решении задачи повышения эффективности поверочных работ. При этом в

связи с невозможностью достоверного и точного определения величин активности радионуклидного источника А установок УПД-ИНТЕР и мощностей доз сопутствующих излучений (вторичного $\dot{X}_{вт}$ и тормозного $\dot{X}_{тор}$) требуется получить эмпирическую модель воспроизводимого поля ионизирующих излучений, базирующуюся на результатах статистической обработки ретроспективных экспериментальных данных, и скоррелировать её с полученной математической моделью.

Для восстановления модели воспроизводимого поля ионизирующих излучений по априорной информации требуется определить вид неизвестной функция $y=f(x)$, заданной табличными значениями ретроспективных результатов опытных измерений. Необходимо найти функцию заданного вида (линейную, квадратичную, полиномиальную и т.п.) $y=F(x)$, которая в соответствующих точках принимает значения, как можно более близкие к табличным. На практике вид функции чаще всего определяют путём сравнения расположения точек с графиками известных функций.

Полученная формула $y=F(x)$, которую называют эмпирической формулой, или уравнением регрессии y на x , или приближающей (аппроксимирующей) функцией, позволяет находить значения $f(x)$ для нетабличных значений x , сглаживая результаты измерений величины y .

Для того чтобы получить параметры функции F , используется метод наименьших квадратов. В этом методе в качестве критерия близости приближающей функции к совокупности точек используется сумма квадратов разностей табличных значений y и теоретических значений, рассчитанных по уравнению регрессии.

Таким образом, требуется найти функцию F , такую, чтобы сумма квадратов S была наименьшей:

$$S = \sum_i (y_i - F(x_i))^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Для получения эмпирической модели дозиметрической установки выполнена статистическая обработка априорной информации, в качестве которой использовались ретроспективные результаты измерений мощности экспозиционной дозы девяти установок УПД-ИНТЕР, эксплуатируемых в девяти различных метрологических подразделениях. В качестве основных эталонных средств поверки применялись универсальные дозиметры ДКС-101 с полостными сферическими ионизационными камерами.

В качестве основного статистического материала использовались сопоставимые многолетние выборки результатов измерений мощности экспозиционной дозы $\dot{X}_j$ на различных расстояниях R_i (от 18 до 20 точек с шагом 5–10 см) без задействования ослабляющих фильтров, подобранные за разные годы поверки. На основании полученных данных с помощью программы Excel построены диаграммы и для каждой из них рассчитаны аппроксимирующие линии тренда. Как известно, ослабление мощности экспозиционной дозы в общем случае происходит по экспоненте. Однако, в связи с особенностями конструкции дозиметрических установок замкнутого типа, к которым относится УПД-ИНТЕР, и происходящих внутри неё процессов, на практике выявлено, что экспоненциальную аппроксимацию возможно применять только при значениях $R_i \geq 50$ см.

В результате исследований [2] определено, что в качестве аппроксимирующей зависимости оптимально подходит полиномиальная линия тренда 4-го порядка, выражаемая в виде:

$$y = b_4 x^4 - b_3 x^3 + b_2 x^2 - b_1 x + b_0. \quad (4)$$

Предполагая, что выражения (2) и (4) равны друг другу, получаем:

$$\left(\frac{A}{k_{\phi j}(R_i^2 \cdot e^{\mu R_i})} + \dot{X}_{вт} + \dot{X}_{тор} \right) \frac{101,3}{p} \cdot \frac{273,15+T}{293,15} = b_4 x^4 - b_3 x^3 + b_2 x^2 - b_1 x + b_0. \quad (5)$$

Для того чтобы объединить математическую и эмпирическую модели УПД-ИНТЕР разложим левую часть формулы (5) в степенной ряд Тейлора, предварительно упростив её.

Введём ограничения по условиям применения, которые можно обеспечить на практике: $k_{\phi j} = 1$ (без фильтров), $T=20$ °С, $p=101,3$ кПа. Тогда выражение (5) будет сведено к формуле:

$$\frac{A}{R_i^2 \cdot e^{\mu R_i}} + \dot{X}_{вт} + \dot{X}_{тор} = b_4 x^4 - b_3 x^3 + b_2 x^2 - b_1 x + b_0. \quad (6)$$

Предположим, что разность между экспериментально измеренным значением $\dot{X}_{изм}$ и расчётным значением $\dot{X}_{расч}$, полученным на основе постоянного соблюдения закона квадратов расстояний C_i для открытой геометрии, будет определять суммарный вклад $\dot{X}_{вт}$ и $\dot{X}_{тор}$ в результат измерений. Критерием наличия вклада $\dot{X}_{вт}$ и $\dot{X}_{тор}$ будем считать условие:

$$\frac{\dot{X}_{jизм} - \dot{X}_{jрасч}}{\dot{X}_{jизм}} \cdot 100 \geq 1 \quad (7)$$

Причём, исходя из известных свойств данных видов сопутствующих излучений предполагается, что на началь-

ном отрезке диапазона рабочих расстояний будет в большей степени проявляться $\dot{X}_{итор}$, а на конечном – $\dot{X}_{ивт}$. Данная гипотеза подтверждается в результате обработки ретроспективных экспериментальных данных для трёх установок (таблицы 1–3).

Таблица 1

Результаты расчётов $\dot{X}_{ивт}$ и $\dot{X}_{итор}$ для УПД-ИНТЕР № 57

$R, \text{ см}$	$\dot{X}_{jизм}, \text{ мГр/ч}$	$\dot{X}_{jрасч}, \text{ мГр/ч}$	$\Delta, \%$	$\dot{X}_{итор}, \text{ мГр/ч}$	$\dot{X}_{ивт}, \text{ мГр/ч}$
25	1327,00	1249,50	5,8	77,50	-
30	907,40	867,29	4,4	40,11	-
40	498,30	487,40	2,2	10,90	-
50	315,10	311,65	1,1	3,45	-
60	217,20	216,20	0,5	-	-
70	158,80	158,70	0,1	-	-
80	121,50	121,40	0,1	-	-
90	95,98	95,83	0,2	-	-
100	77,55	77,55	0,0	-	-
110	64,14	64,03	0,2	-	-
120	53,90	53,75	0,3	-	-

Таблица 2

Результаты расчётов $\dot{X}_{ивт}$ и $\dot{X}_{итор}$ для УПД-ИНТЕР № 62

$R, \text{ см}$	$\dot{X}_{jизм}, \text{ Р/ч}$	$\dot{X}_{jрасч}, \text{ Р/ч}$	$\Delta, \%$	$\dot{X}_{итор}, \text{ Р/ч}$	$\dot{X}_{ивт}, \text{ Р/ч}$
25	119,9	115,0	4,1	4,90	-
30	82,32	79,85	3,0	2,47	-
35	60,07	58,64	2,4	1,43	-
40	45,59	44,88	1,6	0,71	-
45	35,86	35,44	1,2	0,42	-
50	28,97	28,69	1,0	0,28	-
55	23,89	23,70	0,8	-	-
60	20,03	19,91	0,6	-	-
65	17,02	16,96	0,4	-	-
70	14,64	14,61	0,2	-	-
75	12,72	12,72	0,0	-	-
80	11,18	11,18	0,0	-	-
90	8,83	8,82	0,1	-	-
100	7,14	7,14	0,0	-	-
110	5,91	5,90	0,2	-	-
120	4,97	4,95	0,4	-	-
130	4,24	4,21	0,7	-	-
135	3,95	3,91	1,0	-	0,04

Таблица 3

Результаты расчётов $\dot{X}_{ивт}$ и $\dot{X}_{итор}$ для УПД-ИНТЕР № 63

$R, \text{ см}$	$\dot{X}_{jизм}, \text{ мГр/ч}$	$\dot{X}_{jрасч}, \text{ мГр/ч}$	$\Delta, \%$	$\dot{X}_{итор}, \text{ мГр/ч}$	$\dot{X}_{ивт}, \text{ мГр/ч}$
25	1295,62	1224,50	5,5	71,12	-
30	884,09	849,96	3,9	34,13	-
40	489,17	477,66	2,4	11,51	-
50	309,55	305,42	1,3	4,13	-
60	213,77	211,90	0,9	-	-
70	155,99	155,54	0,3	-	-
80	118,99	118,97	0,0	-	-
90	94,01	93,91	0,1	-	-
100	76,00	76,00	0,0	-	-
110	62,69	62,75	-0,1	-	-
120	52,83	52,68	0,3	-	-

Из полученных результатов, приведённых в таблицах 1–3, следует, что $\dot{X}_{итт}$ начинает проявляться только на верхней границе диапазона рабочих расстояний УПД-ИНТЕР, а весомый вклад в итоговый результат измерений $\dot{X}_{изм}$ вносит лишь $\dot{X}_{итт}$ на начальных расстояниях ($25 \leq R_i \leq 50$ см). Это объясняет выше озвученный факт о возможности применения классической экспоненциальной аппроксимации только при значениях $R_i \geq 50$ см.

Исходя из вышеописанных выводов, получим упрощённое тождественное выражение для частного случая скоррелированных математической и эмпирической моделей:

$$\frac{A}{R_i^2 \cdot e^{\mu R_i}} + \dot{X}_{итт} = b_4 x^4 - b_3 x^3 + b_2 x^2 - b_1 x + b_0. \quad (8)$$

Для подтверждения корреляции математической и эмпирической моделей требуется разложить левую часть формулы (8) в степенной ряд Тейлора и найти область сходимости полученного ряда для некоторого значения $x_0 = R_0$.

Сделаем предположение, что в окрестности точки $R_0 = 100$ см, существует непрерывная область X такая, что для всех $x \in X$. Анализируя данные таблиц 1–3, получим $\dot{X}_{итт} = 0$. Таким образом, раскладывая в ряд будем только функцию $f(x) = \frac{A}{x^2 e^{\mu x}}$.

Найдём все значимые производные от $f(x)$. Первая производная:

$$\begin{aligned} f'(x) &= -A(x^2 e^{\mu x})^{-2} \cdot (2x e^{\mu x} + \mu x^2 e^{\mu x}) = \\ &= -\frac{A e^{\mu x} x(2 + \mu x)}{x^4 e^{2\mu x}} = -\frac{A(2 + \mu x)}{x^3 e^{\mu x}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Вторую производную от $f(x)$ возможно получить двумя способами, приводящими к одинаковому результату:

$$\begin{aligned} f''(x) &= -\frac{A \mu x^3 e^{\mu x} - A(2 + \mu x)(3x^2 e^{\mu x} + \mu x^3 e^{\mu x})}{x^6 e^{2\mu x}} = \\ &= -A \frac{\mu x - (2 + \mu x)(3 + \mu x)}{x^4 e^{\mu x}} = \\ &= -A \frac{\mu x - 6 - 2\mu x - 3\mu x - \mu^2 x^2}{x^4 e^{\mu x}} = \\ &= -A \frac{-4\mu x - 6 - \mu^2 x^2}{x^4 e^{\mu x}} = A \frac{\mu^2 x^2 + 4\mu x + 6}{x^4 e^{\mu x}} \end{aligned} \quad (10)$$

или

$$\begin{aligned} f''(x) &= -A \frac{\mu x^3 e^{\mu x} - (2 + \mu x)(3x^2 e^{\mu x} + \mu x^3 e^{\mu x})}{x^6 e^{2\mu x}} = \\ &= -A \frac{e^{\mu x} \mu x^3 - 6x^2 e^{\mu x} - 2\mu x^3 e^{\mu x} - 3\mu x^3 e^{\mu x} + \mu^2 x^4 e^{\mu x}}{x^6 e^{2\mu x}} = \\ &= -A \frac{\mu x^3 - 6x^2 - 2\mu x^3 - 3\mu x^3 - \mu^2 x^4}{x^6 e^{\mu x}} = \\ &= -A \frac{-4\mu x^3 - 6x^2 - \mu^2 x^4}{x^6 e^{\mu x}} = A \frac{\mu^2 x^2 + 4\mu x + 6}{x^4 e^{\mu x}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Третья производная от $f(x)$ определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} f'''(x) &= A \frac{(2\mu^2 x + 4\mu)x^4 e^{\mu x} - (\mu^2 x^2 + 4\mu x + 6)(4x^3 e^{\mu x} + \mu x^4 e^{\mu x})}{x^8 e^{2\mu x}} = \\ &= A \frac{2\mu^2 x^5 + 4\mu x^4 - 4\mu^2 x^5 - \mu^3 x^6 - 6\mu x^4 - 4\mu^2 x^5 - 24x^3 - 6\mu x^4}{x^8 e^{\mu x}} = \\ &= A \frac{-\mu^3 x^6 - 6\mu^2 x^5 - 18\mu x^4 - 24x^3}{x^8 e^{\mu x}} = \\ &= -A \frac{\mu^3 x^3 + 6\mu^2 x^2 + 18\mu x + 24}{x^5 e^{\mu x}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Наконец, выведем четвёртую производную от $f(x)$:

$$\begin{aligned} f^{(4)}(x) &= -A \frac{(3\mu^3 x^2 + 12\mu^2 x + 18\mu)x^5 e^{\mu x} - (\mu^3 x^3 + 6\mu^2 x^2 + 18\mu x + 24)(5x^4 e^{\mu x} + \mu x^5 e^{\mu x})}{x^{10} e^{2\mu x}} = \\ &= -A \frac{3\mu^3 x^7 + 12\mu^2 x^6 + 18\mu x^5 - 5\mu^3 x^7 - \mu^4 x^8 - 30\mu^2 x^6 - 6\mu^3 x^7 - 90\mu x^5 - 18\mu^2 x^6 - 120x^4 - 24\mu x^5}{x^8 e^{\mu x}} = \\ &= -A \frac{-8\mu^3 x^7 - 36\mu^2 x^6 - 96\mu x^5 - 120x^4 - \mu^4 x^8}{x^{10} e^{\mu x}} = A \frac{\mu^4 x^4 + 8\mu^3 x^3 + 36\mu^2 x^2 + 96\mu x + 120}{x^6 e^{\mu x}}. \end{aligned} \quad (13)$$

В общем виде степенной ряд Тейлора для функции $f(x)$ выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} f(x) &= f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \\ &+ \frac{f'''(x_0)}{3!}(x - x_0)^3 + \frac{f^{(4)}(x_0)}{4!}(x - x_0)^4 + \dots, \end{aligned} \quad (14)$$

который при упрощении принимает вид:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2}(x^2 - 2x_0 x + x_0^2) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{f'''(x_0)}{6}(x^3 - 3x^2x_0 + 3xx_0^2 - x_0^3) + \\
& + \frac{f^{(4)}(x_0)}{24}(x^4 - 4x^3x_0 + 6x^2x_0^2 - 4xx_0^3 + x_0^4) + \dots
\end{aligned} \quad (15)$$

При этом полиномиальные весовые коэффициенты полученного степенного ряда будут рассчитываться по формулам:

$$b_0 = f(x_0) - f'(x_0)x_0 + \frac{f''(x_0)}{2}x_0^2 - \frac{f'''(x_0)}{6}x_0^3 + \frac{f^{(4)}(x_0)}{24}x_0^4 \quad (16)$$

$$b_1 = f'(x_0) - f''(x_0)x_0 + \frac{f'''(x_0)}{2}x_0^2 - \frac{f^{(4)}(x_0)}{6}x_0^3 \quad ;x \quad (17)$$

$$b_2 = \frac{f''(x_0)}{2} - \frac{f'''(x_0)}{2}x_0 + \frac{f^{(4)}(x_0)}{4}x_0^2 \quad ;x^2 \quad (18)$$

$$b_3 = \frac{f'''(x_0)}{6} - \frac{f^{(4)}(x_0)}{6}x_0 \quad ;x^3 \quad (19)$$

$$b_4 = \frac{f^{(4)}(x_0)}{24} \quad ;x^4 \quad (20)$$

Далее определяем производные для точки $x_0=20$ на интервале числа рабочих расстояний от 5 до 40. Подставив известные значения для УПД-ИНТЕР № 62 (2021 год): $A=1,29 \cdot 10^{12}$ Бк (из паспорта на источник) и $\mu=9,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ (справочные данные по ГОСТ 8.087–2000 [3]) и расчётные значения ($b_0 \dots b_4$), получим следующие функциональные ряды:

$$y(x) = \frac{A}{x^2 e^{\mu x}},$$

ряд $df(x_0)$ – получен из формул (9) – (15),

ряд $f(x_0)$ через b – получен из формул (16) – (20),

Графическое изображение полученных результатов представлено на рисунке 3.

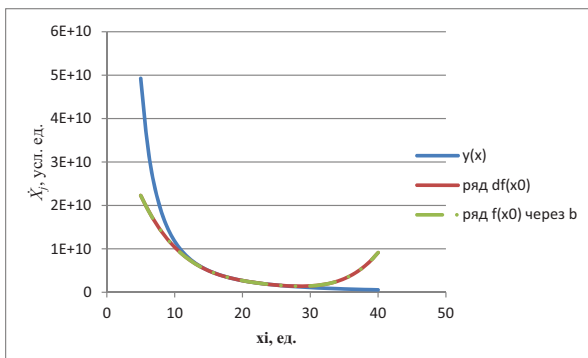


Рисунок 3 – Графики скоррелированных математической и эмпирической моделей

На рисунке 3 наблюдается совпадение графиков рядов $df(x_0)$ и $f(x_0)$, выраженных через производные и коэффициенты степенного ряда соответственно, что подтверждает адекватность проведённого разложения в степенной ряд Тейлора для функции $f(x)$. Также наглядно видна область сходимости графиков указанных рядов с частной функцией математической модели установки $y(x)$ на интервале условных расстояний от 13 до 27. Причём расхождение графиков для $x_i < 13$ предположительно обусловлено введёнными ранее ограничениями и допущениями (условное значение активности источника, отсутствие сопутствующих излучений, нормальные климатические условия), а «взлёт» функций рядов для $x_i > 27$ не имеет критического значения на практике, так как проявляется вне рабочей зоны длин линейки УПД-ИНТЕР ($R_{max} = 140 \text{ см}$).

Таким образом, подтверждённая возможность корреляции математической и эмпирической моделей установки УПД-ИНТЕР позволяет сделать вывод об адекватности предложенного подхода в рамках принятых допущений и ограничений. Последующая программная реализация предложенного подхода при организации периодической поверки дозиметрических установок замкнутого типа позволит сформировать нормативно-методическую основу с элементами моделирования и автоматизации процессов измерений, что обеспечит существенное сокращение трудозатрат, и как следствие, уменьшение степени облучения поверителей.

Литература

1. Установки поверочные дозиметрические УПД-ИНТЕР2М. Описание типа средства измерений. Номер по Госреестру 36895–08.
2. Стяжкин В.А. Исследование возможности моделирования поля ионизирующих излучений в замкнутых дозиметрических установках // Сборник докладов X научно-практической конференции «Обеспечение единства измерений в области использования атомной энергии». – Сочи, 2023.
3. ГОСТ 8.087–2000. Установки дозиметрические рентгеновского и гамма-излучений эталонные. Методика поверки по мощности экспозиционной дозы и мощности кермы в воздухе.

ПОЛУЧЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПЫЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ OBTAINING MODEL AEROSOLS FOR TESTING DUST MEASURING EQUIPMENT

Т. В. Колобашкина, доцент, кандидат технических наук, доцент
Н.Н. Скориантов, доцент, кандидат технических наук, доцент
Р. Н. Целмс, доцент, кандидат технических наук
М. А. Скоков, студент

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

T. V. Kolobashkina, PhD, Tech., Associate Professor

N.N. Skoriantov, PhD, Tech., Associate Professor

R. N. Tselms, PhD, Tech., Associate Professor

M. A. Skokov, Student

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

+7(812)494-70-15, tanya.kolobashkina@mail.ru;

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

+7(812)494-70-75 tselms_un@poshta.tvoye.tv;

+7(812)494-70-15, tanya.kolobashkina@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен генератор аэрозоля, основанный на распылении суспензий монодисперсных полистироловых латексов сжатым воздухом. Приведены рекомендации по приготовлению суспензий монодисперсных латексов с целью получения на выходе генератора модельного аэрозоля с параметрами, соответствующими исходному латексу.

Annotation. An aerosol generator based on spraying suspensions of monodisperse polystyrene latexes with compressed air is considered. Recommendations are given for the preparation of suspensions of monodisperse latexes in order to obtain a model aerosol at the output of the generator with parameters corresponding to the original latex.

Ключевые слова: аэрозольные загрязнения, монодисперсные полистироловые латексы, суспензия, распылитель, генератор модельного аэрозоля, дисперсный состав.

Keywords: aerosol contaminants, monodisperse polystyrene latexes, suspension, sprayer, model aerosol generator, dispersed composition.

Транспорт, энергетические установки, промышленные предприятия способствуют интенсивному загрязнению окружающей среды. В первую очередь, это оксиды серы, азота, углерода, аммиак, фреоны, углеводороды, тяжелые металлы.

Атмосферный воздух является наиболее подвижным из всех природных сред. Поэтому загрязняющие атмосферу химические вещества быстро распространяются на большие расстояния и обнаруживаются повсеместно на нашей планете. Загрязнение атмосферы является причиной глобальных экологических проблем, к которым относят изменение климата планеты и разрушение озонового слоя.

Один из наиболее серьезных факторов – наличие в воздухе аэрозольных загрязнений. Аэрозоли относят к дисперсным системам, где дисперсионной средой является воздух, а дисперсной фазой – частицы твердого или жидкого вещества [1]. Аэрозольные загрязнения уменьшают прозрачность атмосферы, угнетают рост растений, способствуют порче зданий и оборудования. От содержания в воздухе токсичных и канцерогенных веществ, таких как тяжелые металлы, находящихся в аэрозольной форме, в

значительной мере зависит продолжительность жизни человека.

Оперативный и достоверный контроль уровня загрязнения воздушной среды требует соответствующего метрологического обеспечения применяемых средств измерений. Поэтому создание модельных аэрозолей с узким спектром размеров частиц, имеющих одинаковую форму, и стабильной концентрацией для градуировки и поверки аэрозольной аппаратуры является актуальной задачей.

Для получения модельного аэрозоля предлагается генератор, основанный на распылении суспензий чистым сжатым воздухом [2]. Для приготовления суспензий используются монодисперсные полистироловые латексы со сферической формой частиц, которые разбавляются жидкостью, например, дистиллированной водой. Суспензия монодисперсных частиц, распыляясь, превращается в туман, капельки которого содержат твердые частицы. Эти капли смешиваются с очищенным и осушенным потоком газа-носителя, в результате чего происходит испарение жидкости. Капли воды, образующиеся при распылении, будут содержать пропорцио-

нальное их объему число частиц лишь в случае достаточно концентрированных суспензий. При низкой концентрации во многих из самых мелких капель, очевидно, не будет содержаться ни одной частицы. Наличие более одной частицы в каплях ведет при их испарении к образованию «двойников», «тройников» и т.д. Это приводит к увеличению размеров частиц аэрозоля на выходе генератора по сравнению с размерами частиц исходного латекса, что ухудшает степень монодисперсности модельного аэрозоля.

Вероятность $P(n)$ того, что n частиц встретится в капле с диаметром d_0 , рассчитана по формуле Пуассона [3]:

$$P(n) = \frac{(\bar{n})^n}{n!} e^{-\bar{n}}, \quad (1)$$

где $\bar{n} = x (d_0/d)^3$ – среднее число приходящихся на капельку частиц; x – доля объема, занимаемой частицами суспензии; d_0 – диаметр капли; d – диаметр частицы латекса.

Расчеты по формуле (1) были сделаны для латексов с диаметром частиц $d = 0,5$ мкм и $d = 1,0$ мкм при условии, что диаметр капель воды изменяется от 1 до 10 мкм, а n принимает значения от 1 до 3.

На рисунке 1 приведены значения вероятности $P(n)$, полученные для суспензий различных концентраций и $d = 0,5$ мкм.

Результаты исследований влияния размера капель, размера частиц латекса и концентрации суспензии на степень монодисперсности аэрозоля представлены в таблице 1.

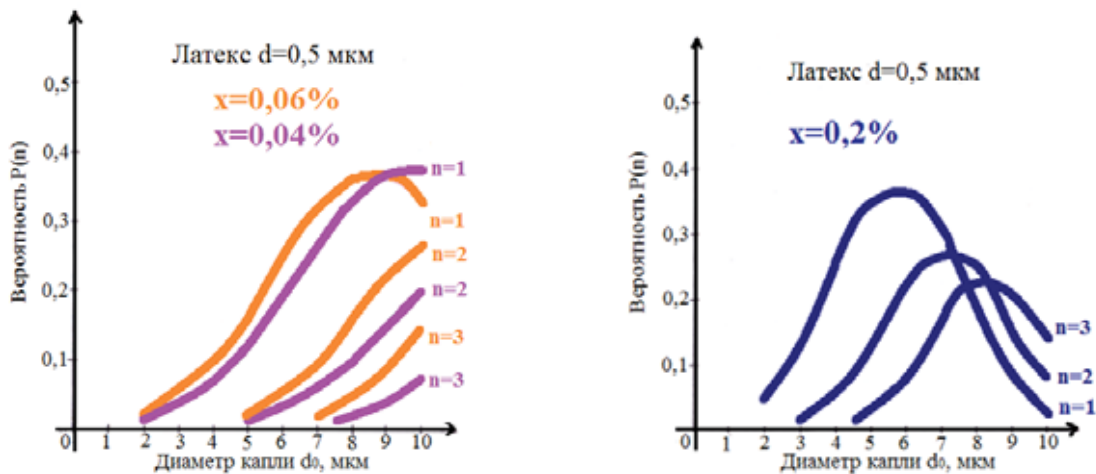


Рисунок 1 – Вероятность содержания одной ($n=1$), двух ($n=2$) и трех ($n=3$) частиц латекса в капле воды при распылении суспензий различных концентраций с частицами латекса $d = 0,5$ мкм

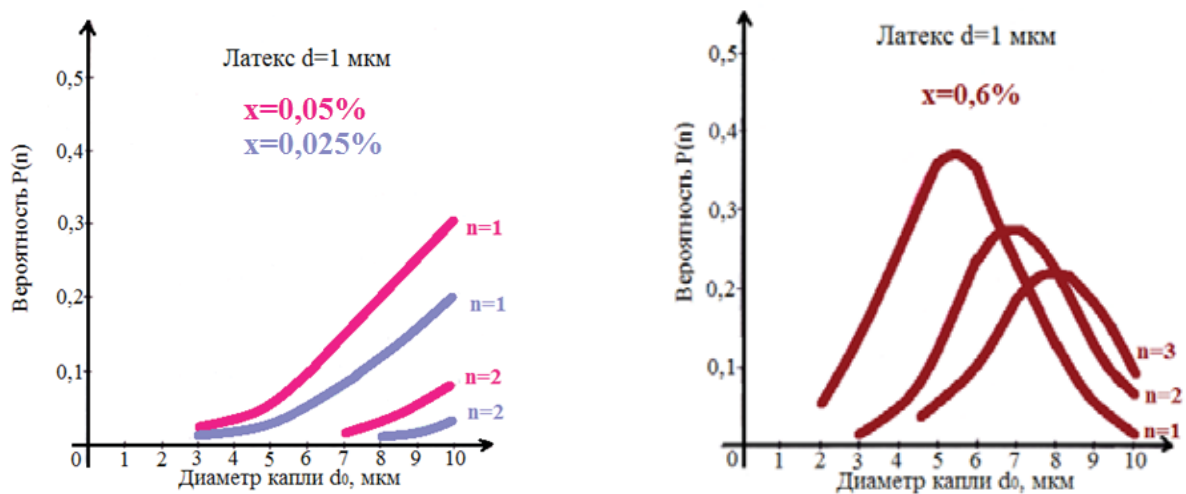


Рисунок 2 – Вероятность содержания одной ($n=1$), двух ($n=2$) и трех ($n=3$) частиц латекса в капле воды при распылении суспензий различных концентраций с частицами латекса диаметром $d = 1$ мкм

Влияние размера капель, размера частиц латекса и концентрации суспензии на степень монодисперсности аэрозоля

Диаметр капли d_0 , мкм	Диаметр частицы латекса d , мкм	Концентрация суспензии x , %	P(n)			Ухудшение степени монодисперсности аэрозоля, %
			n = 1	n = 2	n = 3	
3	1	0,05	0,015	0	0	0
4			0,035	0	0	0
5			0,060	0	0	0
6			0,1	0	0	0
7			0,15	0,01	0	6,25
8			0,2	0,025	0	11,1
9			0,25	0,05	0	16,7
10			0,3	0,075	0	20
3	1	0,1	0,025	0	0	0
4			0,06	0	0	0
5			0,11	0,01	0	8,3
6			0,175	0,02	0	10,2
7			0,25	0,04	0	13,8
8			0,31	0,08	0,02	24,4
3	1	0,2	0,05	0	0	0
4			0,11	0,01	0	8,3
5			0,2	0,025	0	10
6			0,275	0,06	0,01	20,3
7			0,35	0,12	0,03	30
3	1	0,4	0,1	0,015	0	4,8
4			0,2	0,025	0	11,2
5			0,3	0,075	0,01	22
3	1	0,6	0,14	0,01	0	6,7
4			0,25	0,05	0	16,7
5			0,35	0,125	0,04	32
3	1,9	1	0,025	0	0	0
4			0,085	0	0	0
5			0,15	0,01	0	6,2
6			0,24	0,025	0	9,4
7			0,3	0,05	0,01	16,7

На основании данных, приведенных в таблице, можно сделать следующие выводы:

- для получения высокодисперсного аэрозоля с диаметром частиц $d = 1$ мкм необходимо сильное разбавление исходного латекса жидкостью;
- при среднем диаметре образующихся капель жидкости d_0 не более 5 мкм и концентрации суспензии не более 0,2 % ухудшение степени монодисперсности аэрозоля на выходе генератора не превысит 10%.

По результатам исследований можно подобрать концентрации водных растворов латексов и выбрать конструкцию и режим работы распылителя для получения капель жидкости требуемого размера.

Для тонкого распыления жидкости в распылителе использован пневматический способ распыления, при котором вытекающая из сопла жидкость дробится движущимся с большой скоростью воздухом. Для этих распылителей характерен широкий диапазон размеров капель, который можно сузить, улавливая крупные капли в самом распы-

лителе. Для этого в распылителе может быть установлена отражательная перегородка или сетка с ячейками заданного размера, через которую пропускают поток газа-носителя с каплями распыленной суспензии. Капли, непрошедшие через сетку, сдувает дополнительный поток газа-носителя.

Схема пневматического прямоструйного распылителя представлена на рисунке 3.

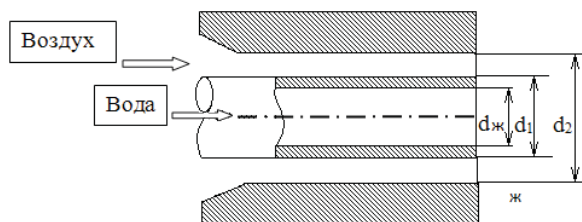


Рисунок 3 – Схема пневматического прямоструйного распылителя

$d_ж$ – внутренний диаметр жидкостного сопла, мм;
 d_1 – наружный диаметр жидкостного сопла, мм; d_2 – внутренний диаметр газового сопла, мм.

Массовый медианный радиус r_m капель распыла может быть рассчитан по эмпирической формуле [4].

$$r_m = \frac{110M_{\text{ж}}d_{\text{ж}}^{0,5}}{[(d_2^2 - d_1^2)(p_{\text{изб}} + 1)]} \quad (2)$$

где $M_{\text{ж}}$ – массовый расход распыливаемой жидкости, г/с; $M_{\text{г}}$ – массовый расход распыливаемого газа, г/с.

Из выражения (2) следует, что для получения мелкого распыла при заданном значении $M_{\text{ж}}$ необходимо выбрать малые $d_{\text{ж}}$ и d_1 и большие d_2 и $p_{\text{изб}}$.

Если выбрать $d_{\text{ж}} = 1,5$ мм, $d_1 = 2,5$ мм, $d_2 = 4,0$ мм, то для получения капель диаметром 5...8 мкм необходимо работать при $p_{\text{изб}} = 2,5...3$ атм.

Для проведения надежных испытаний пылеизмерительной аппаратуры осуществлялся контроль размеров частиц модельного аэрозоля и стабильность его концентрации на выходе генератора. Для контроля размеров частиц и их счетной концентрации использовался счетчик аэрозольных частиц АЗ-10 [5]. Для контроля стабильности концентрации модельного аэрозоля во времени использовался анализатор пыли ИКП-5, измеряющий мгновенное значение концентрации аэрозоля [6].

Результаты экспериментального исследования параметров модельного аэрозоля, полученного при распылении суспензии концентрацией $x = 0,2\%$ с частицами латекса диаметром $d = 1$ мкм, представлены на рисунке 4.

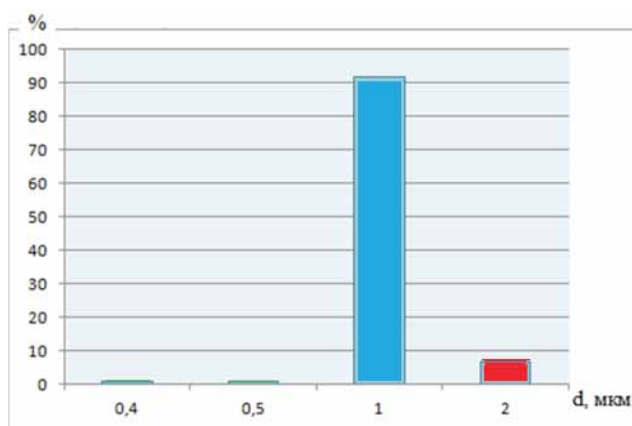


Рисунок 4 – Гистограмма при концентрации суспензии $x = 0,2\%$ с частицами латекса диаметром $d = 1$ мкм

Погрешность воспроизведения параметров исходного латекса в модельном аэрозоле составляет 8,3%.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- при заданных размерах частиц латексов увеличение концентрации суспензии требует уменьшения размера капель, образующихся при распылении;

- с увеличением размера частиц латекса при заданных размерах капель допустимы более концентрированные суспензии при сохранении малого количества «двойников». Так при $d_0 = 5$ мкм и $d = 1$ мкм допустимая концентрация суспензии $x = 0,2\%$, при $d = 1,9$ мкм – $x = 1\%$.

При соблюдении указанных рекомендаций на выходе генератора можно получить модельный аэрозоль с погрешностью воспроизведения параметров исходного латекса, не превышающей 10%, что соответствует методике поверки счётчиков аэрозольных частиц [7].

Библиографический список

1. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с англ. под ред. Б.Ф. Садовского. – М.: Мир, 2014. – 280 с.
2. А.с. № 876182, СССР. Б.И. № 40, 1981.
3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы: Пер. с англ. под ред. Н.А. Фукса. – Л.: Химия, Ленинградское отд., 1969. – 428 с.
4. Виснапуу Л.Ю. //Методы и приборы контроля параметров окружающей среды.: Межвуз. сб. науч. тр. Ленинградский ин-т авиационного приборостроения, 1979. – Вып.1(136). – С. 99–102.
5. Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10. Руководство по эксплуатации ЭКИТ 7.830.000 РЭ, Москва, 2010. – 10 с.
6. Анализатор пыли ИКП-5. Руководство по эксплуатации ШДЕК 416 339.002 РЭ. – СПб., 2009. – 5 с.
7. Счётчики аэрозольных частиц АэроПлюс. Методика поверки. МП 242–2537–2023. ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, 2023 г.

О РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУР МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО САМОКОНТРОЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВИБРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ВНУТРЕННИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДЕФОРМАЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА МЕСТЕ ИХ УСТАНОВКИ

ON THE IMPLEMENTATION OF PROCEDURES FOR METROLOGICAL SELF-MONITORING OF PIEZOELECTRIC VIBRATION TRANSDUCERS WITH INTERNAL EXCITATION OF DEFORMATION OF SENSITIVE ELEMENTS AT THEIR INSTALLATION SITE

Ольховский А.Н., к.т.н., старший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Кувыкин Ю.А., к.т.н., старший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Щедрин А.Ю., младший научный сотрудник, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,

Olkhovsky A.N., c.t.s., senior researcher, FSBI «MSMC» of Russia Ministry of Defense,

Kuvykin Yu.A., c.t.s., senior researcher, FSBI «MSMC» of Russia Ministry of Defense,

Shchedrin A.Yu., junior researcher, FSBI «MSMC» of Russia Ministry of Defense

e-mail: rusregister.ano@mail.ru, original.rus@mail.ru, nemoalex4@list.ru

tel. 8(910)431-12-44, 8(977)268-75-98, 8(961)030-56-53

Аннотация: Рассмотрены существующие, а также предложены новые технические и конструктивные решения для реализации процедур метрологического самоконтроля вибропреобразователей с внутренним возбуждением деформации чувствительных элементов на месте их установки.

Abstract: The existing ones are considered, as well as new technical and constructive solutions are proposed for the implementation of procedures for metrological self-monitoring of vibration transducers with internal excitation of deformation of sensitive elements at the site of their installation.

Ключевые слова: вибропреобразователь с внутренним возбуждением деформации чувствительных элементов, метрологический самоконтроль.

Keywords: information and measurement system, metrological self-control, vibration transducer with internal excitation of deformation of sensitive elements.

В современных информационно-измерительных системах (далее – ИИС) для измерений и контроля вибрационных характеристик энергетических установок, оборудования и корпусных конструкций широко применяются пьезоэлектрические вибропреобразователи (далее – ПВ). При этом, как правило, ПВ устанавливаются в труднодоступных местах конструкции объекта, что затрудняет, а в некоторых случаях делает невозможным их демонтаж с места установки без нарушения конструкции. Таким образом, задача реализации в автоматическом режиме процедур их технического и метрологического самоконтроля (далее – ТСК и МСК) на месте установки является актуальной и значимой.

Под «техническим самоконтролем» ПВ подразумеваются только процедуры проверки их работоспособности, то есть технической исправности при реализации измерительной функции, без определения метрологических характеристик (далее – МХ). Под «метрологическим самоконтролем» подразумевается автоматическая проверка метрологической исправности (далее – МЛИ) ПВ в процессе их эксплуатации, осуществляемая с

использованием принятого опорного значения, формируемого с помощью встроенного в датчик средства (измерительного преобразователя или меры) или выделенного дополнительного параметра выходного сигнала [1].

Принятое опорное значение параметра, характеризующего критическую составляющую погрешности, устанавливается на этапах разработки, проведения испытаний в целях утверждения типа ПВ (разработке методик поверки), а при необходимости – и в процессе разработки методики калибровки.

МСК должен опираться на дополнительные данные, получаемые за счет использования и применения пространственной (структурной), временной, информационной (функциональной) избыточности, имеющейся или специально сформированной в датчике и/или измерительной системе. Объем дополнительных данных может быть увеличен путем комбинации этих видов избыточности [2].

Основной целью МСК является снижение вероятности получения недостоверной измерительной информации в период эксплуатации ИИС, обуславливающей выход МХ первичных изме-

рительных преобразователей за установленные допускаемые пределы, и поддержание коэффициента готовности к применению на достаточно высоком уровне. В ходе МСК ИИС определяется уровень МлИ их измерительных каналов (далее – ИК).

Результаты МСК могут быть основанием для следующих действий [2]:

- оценки остаточного метрологического ресурса (далее – МлР);
- изменения интервала между поверками ПВ установленным порядком;
- коррекции функции преобразования (коэффициента преобразования) ПВ.

Отличительной особенностью конструкции рассматриваемых в статье ПВ является наличие двух блоков пьезоэлектрических дисков (одиночных пьезоэлектрических дисков для реализации внутреннего возбуждения деформации чувствительных элементов (далее – ВВД): блок ТСК (МСК) и блок пьезоэлектрических дисков для измерений вибрации (далее – блок ИВ), конструктивно разделенных, как правило, инерционной (измерительной) массой.

При проведении самоконтроля блок ТСК работает в режиме обратного пьезоэлектрического эффекта, что вызывает соответствующую механическую деформацию пьезоэлементов второго блока ИВ, работающего в режиме прямого пьезоэлектрического эффекта.

Спецификой метрологического обеспечения ПВ с ВВД, применяемых в ИИС, является то, что они подлежат только первичной (при выпуске из производства или после ремонта) поверке, так как периодическая поверка таких ПВ с ВВД (например, акселерометры типа АП-11УС) не проводится из-за практической сложности или невозможности демонтажа акселерометров, имеющих несъемные протяженные экранируемые кабельные линии связи с мест их установки.

Принимая во внимание всё вышеизложенное, задача реализации процедур МСК ПВ ИИС на месте их установки в течение всего периода эксплуатации объекта до проведения его капитального ремонта должна решаться на основе их интеллектуализации с учетом положений ГОСТ Р 8.734–2011 [2], а также преимуществ и недостатков уже существующих методов МСК, описанных в [3–9].

Для решения указанной задачи авторами рассмотрены существующие и перспективные разработки полезных моделей и действующих образцов ПВ с ВВД для применения в ИИС.

К действующим образцам ПВ с ВВД относятся акселерометры пьезоэлектрические типа АП-11УС, применяемые в ИИС и имеющие функцию автоматического ТСК работоспособности блока ИВ акселерометра [10].

Из отдельных АП-11УС, выступающих в качестве измерительного компонента в совокупности со связующими (линии связи и коммутационные элементы), вычислительными (ПЭВМ) и вспомогательными компонентами ИИС, могут формироваться измерительные каналы (далее – ИК) параметров вибрации, в том числе и синхронизированные по времени для анализа состояния объекта эксплуатации в целом.

На рисунке 1 представлена схема конструкции АП-11УС (без измерительной схемы канала ИИС).

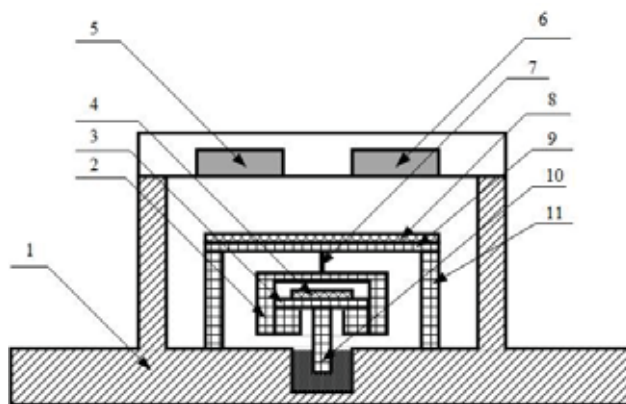


Рисунок 1 – Схема конструкции АП-11УС (без измерительной схемы канала ИИС)

На рисунке 1 приведены: 1 – корпус; 2 – инерционная масса; 3 – металлическая подложка; 4 – пьезоэлектрический диск, работающий в режиме обратного пьезоэлектрического эффекта (блок ТСК); 5 – усилитель с фильтрами частот; 6 – генератор тестового сигнала; 7 – соединительный стержень; 8 – пьезоэлектрический диск, работающий в режиме прямого пьезоэлектрического эффекта (блок ИВ); 9 – металлическая подложка; 10 – опорный стержень блока ИВ; 11 – опорный полый цилиндр блока МСК.

Акселерометры АП-11УС имеют два режима работы:

- рабочий режим, обеспечивающий получение измерительной информации о величине виброускорения в различных частях объекта контроля с блока ИВ ПВ (с нормированной погрешностью, определенной в ТУ);

- режим ТСК, обеспечивающий проверку работоспособности ИК с АП-11УС за счёт блока ТСК ПВ, состоящего из встроенного импульсного генератора, управление которым производится по одному из проводов кабеля, и возбуждителя – пьезоэлектрического элемента (далее – ПЭ), работающего в режиме обратного пьезоэлектрического эффекта.

В режиме ТСК генератор импульсов формирует тестовый сигнал самоконтроля переменного напряжения в виде меандра, который подается на блок ТСК ПВ. Это вызывает деформацию и колебания ПЭ блока ТСК ПВ (обратный пьезоэффект). Эти колебания через жесткий соединительный стержень передаются на инерционную массу, соединённую с ПЭ (чувствительный элемент) блока ИВ, что эквивалентно воздействию величины ускорения контролируемого объекта на основание акселерометра АП-11УС (прямой пьезоэффект).

Отказом АП-11УС считается:

- отклонение (измеренного ПЭ блока ИВ) уровня виброускорения (воспроизводимого ПЭ блока ТСК ПВ) от контрольной величины, записанной в базу данных ИИС при проведении специальных измерений на начальном этапе подготовки объекта к эксплуатации (паспортизации), на величину, превышающую допустимое значение, указанное в эксплуатационной документации;

- отсутствие отклика с ПЭ блока ИВ после формирования тестового сигнала в блоке ТСК ПВ.

Таким образом, режим ТСК, конструктивно реализованный в ПВ с ВВД типа АП-11УС, делает возможным оценку не только работоспособности, но и технического состояния ПВ. При этом его МХ не оцениваются. Это не позволяет существующий режим самоконтроля АП-11УС квалифицировать как режим МСК по следующим причинам:

- отсутствуют процедуры оценки работоспособности и МХ самого блока самоконтроля, так как от его исправной работы напрямую зави-

сят величина и спектр создаваемого им виброускорения для оценки работоспособности и МХ блока ИВ акселерометра;

- МХ, такие как коэффициент преобразования и частотная характеристика (далее – ЧХ) блока самоконтроля не определены, что в свою очередь не позволяет оценить погрешность воспроизведения виброускорения этим блоком, а также требуемую погрешность и достоверность самоконтроля;

- принятый критерий отказа акселерометра АП-11УС – «Отсутствие отклика с ПЭ блока ИВ» не может служить основанием для исключения ИК из результатов работы ИИС, так как блок ТСК и блок ИВ электрически между собой не связаны, а при отказе блока самоконтроля блок ИВ акселерометра АП-11УС может находиться в состоянии МЛИ (ошибка 1-го рода);

- самоконтроль ПВ с ВВД проводится не во всем диапазоне рабочих частот виброускорения, а только в тех полосах частот 1/3-октавного ряда, у которых гармоники (первая и высшие) спектра уровня виброускорения (сигнала в форме меандра) превышают уровень шумов на 20 дБ.

Анализ приведенных причин показал, что количество информации, полученной по результатам ТСК, реализованного на тестовом сигнале в виде меандра, не является достаточным для оценки основных МХ акселерометров (коэффициент преобразования и ЧХ), определяемых при поверке (по ГОСТ Р 8.669–2009) с применением гармонического сигнала вибровозбуждения.

Таким образом, всё вышеизложенное не позволило реализовать в полном объеме процедуру МСК акселерометров в процессе их эксплуатации в составе ИИС.

К потенциально реализуемым полезным моделям ПВ с ВВД для ИИС относится также полезная модель: «Двухканальный акселерометр» (RU 152648 U1,G01P 15/09, 2015.01.28, ЗАО «Вибро-прибор», г. С.-Петербург) [11], реализация которой может быть использована для измерения уровней вибрации установок или двигателей с возможностью постоянного контроля МЛИ двух ИК акселерометра. Структурная схема конструкции «Двухканальный акселерометр» (без элементов управления блока ИВ и блока самоконтроля) представлена на рисунке 2.

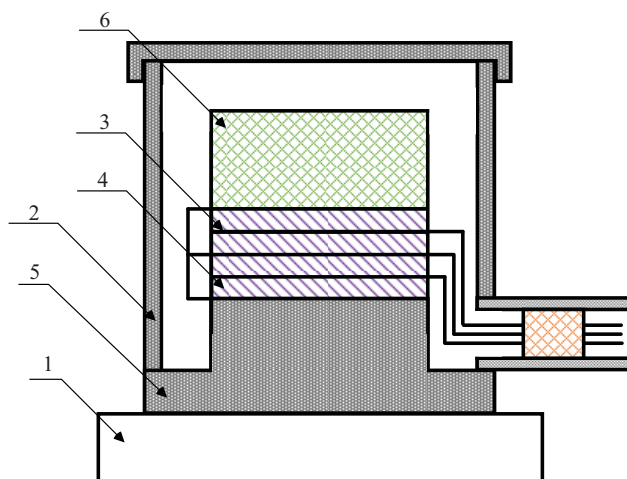


Рисунок 2 – Схема конструкции «Двухканальный акселерометр» (без элементов управления блока ИВ и блока самоконтроля)

Он содержит размещенный на объекте измерения (1) первичный преобразователь, состоящий из: корпуса (2); двух блоков пьезоэлектрических дисков (пьезопакетов) – верхнего (3) и нижнего (4), установленных на основании (5); закрепленной над верхним пьезопакетом (3) общей инерционной массы (6); выходного разъема (7).

Двухканальный акселерометр содержит первичный измерительный преобразователь с двумя пьезопакетами – верхним и нижним, общей инерционной массой, двухканальную измерительную схему, трехпозиционный переключатель и генератор тестового сигнала в виде напряжения синусоидальной частоты.

Оценка и контроль работоспособности акселерометра, то есть ТСК, проводится как при отсутствии, так и при наличии вибрации объекта.

При наличии вибрации сигналы с каждого из пьезопакетов принимаются измерительной аппаратурой и вычисляется отношение этих сигналов, которое фиксируется индикатором. По величине отклонения этого значения от «1» проверяется работоспособность акселерометра. ТСК акселерометра при отсутствии вибрации объекта через трехпозиционный переключатель от генератора попеременно на каждый из пьезопакетов подается тестовый сигнал в виде синусоидального напряжения. С приме-

нением индикатора сравнивается отклонение сигнала, полученного с помощью измерительных приборов, от его начальной величины, зафиксированной на этапе производства, и принимается решение о работоспособности акселерометра.

Технический результат, получаемый при осуществлении полезной модели, заключается в обеспечении идентичности чувствительности ИК акселерометра за счет регулировки параметров применяемых в них усилителей (например, емкости конденсаторов обратной связи усилителя). Вместе с тем среднее квадратическое значение напряжения с выхода генератора тестового сигнала схемы при возбуждении пьезопакетов 3 и 4 не должно отличаться от зафиксированного (например, в паспорте) начального напряжения возбуждения при выпуске из производства.

К ограничениям применения полезной модели двухканальных акселерометров, применительно к ИИС, могут быть отнесены:

- необходимость периодической оценки МХ акселерометра с демонтажем (поверка в лаборатории) или без него (МСК на объекте эксплуатации), поскольку ТСК, реализованный в данном ПВ, не обеспечивает получение необходимой для оценки МХ измерительной информации, в части достоверности и точности;
- технологическая сложность изготовления акселерометра, связанная с необходимостью подбора дополнительной инерционной массы для достижения идентичной чувствительности его ИК;
- значительная трудоемкость или практическая невозможность регулировки усилителей заряда ИК на месте их установки;
- функцией МСК не учитывается возможность переградуировки ПЭ блоков (ИВ и/или МСК) при выходе одного или нескольких ПЭ блока из строя.

К перспективным разработкам полезных моделей ПВ с ВВД относится модель «Пьезоэлектрического измерительного преобразователя вибрации с внутренним возбуждением деформации», описанная в [8].

На рисунке 3 представлен структурный чертеж модели конструкции вышеупомянутого ПВ с электрической схемой измерений и МСК.

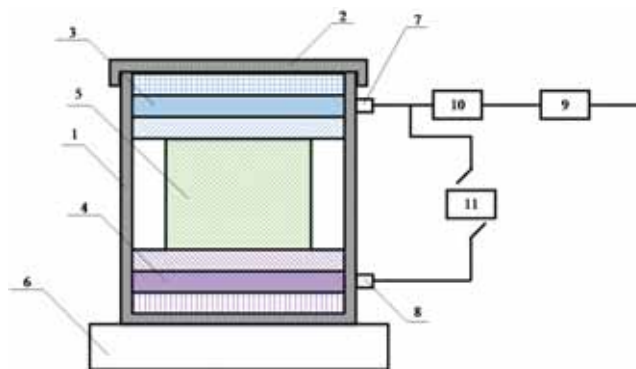


Рисунок 3 – Схема конструкции «Пьезоэлектрического измерительного преобразователя вибрации с внутренним возбуждением деформации»

На рисунке 3 приведены: 1 – корпус; 2 – крышка корпуса; 3 – пакет пьезоэлектрических дисков, работающих в режиме обратного пьезоэлектрического эффекта (блок МСК); 4 – пакет пьезоэлектрических дисков, работающих в режиме прямого пьезоэлектрического эффекта (блок ИВ); 5 – инерционная масса; 6 – объект контроля; 7 – входной разъем; 8 – выходной разъем; 9 – генератор; 10 – усилитель с фильтрами частот; 11 – вольтметр.

Пьезоэлектрический измерительный преобразователь вибрации с ВВД имеет два блока пьезоэлектрических дисков (пьезопакетов), один из которых (блок МСК) работает в режиме обратного пьезоэлектрического эффекта, а другой (блок ИВ) – в режиме прямого пьезоэлектрического эффекта. Совместное использование двух пьезопакетов вибропреобразователя позволяет проводить первичную оценку его МХ в лабораторных условиях при выпуске из производства, а также проводить последующие оценки МХ в эксплуатационных условиях без демонтажа с функционирующего или остановленного объекта измерений и контроля.

Способ деформационной оценки МХ ПВ в условиях эксплуатации заключается в том, что на разъем блока МСК, работающего в режиме обратного пьезоэлектрического эффекта, подается от генератора через усилитель измеряемое вольтметром синусоидальное напряжение, называемое напряжением замещения.

Значение амплитуды напряжения замещения, возбуждающее деформацию пьезопакета и работающего в режиме прямого пьезоэлектрического эффекта, должно быть таким, чтобы напряжение на блоке ИВ и коэффициент преобразования были соответственно равны напряжению на блоке ИВ и коэффициенту преобразования ПВ при оценке его МХ с использованием лабораторного вибростенда.

К недостаткам модели «Пьезоэлектрического измерительного преобразователя вибрации с внутренним возбуждением деформации», имеющего функцию МСК относятся:

- отсутствие процедур оценки работоспособности и МХ самого блока самоконтроля, так как от его исправной работы напрямую зависят величина и спектр создаваемого им виброускорения для оценки работоспособности и МХ блока ИВ ПВ;
- МХ (коэффициент преобразования и ЧХ) блока самоконтроля не определены, что в свою очередь не позволяет оценить погрешность воспроизведения виброускорения этим блоком, а также требуемую погрешность и достоверность самоконтроля;
- функцией МСК не учитывается возможность переградуировки ПЭ блоков (ИВ и/или МСК) при выходе одного или нескольких ПЭ блока из строя.

Для устранения указанных выше недостатков и ограничений по всем рассмотренным ПВ с ВВД авторами разработаны и предложены новые технические и конструктивные решения для ПВ, а также предложены другие виды тестовых сигналов и расширенные алгоритмы обработки информации для реализации процедур МСК в полном объеме на местах их установки.

В качестве прототипа предлагаемого технического решения принята конструкция и схема измерений «Пьезоэлектрического измерительного преобразователя вибрации с внутренним возбуждением деформации», имеющего функцию МСК только для блока ИВ ПВ (см. рисунок 3).

На рисунке 4 представлен схематический чертеж конструкции ПВ с ВВД предлагаемой полезной модели со схемой измерений и режимом МСК.

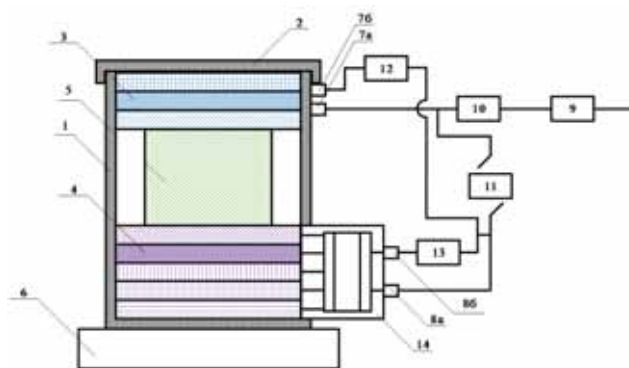


Рисунок 4 – Схема конструкции
«Пьезоэлектрического измерительного
преобразователя вибрации с внутренним
возбуждением деформации со схемой измерений и
режимом МСК»

На рисунке 4 приведены: 1 – корпус; 2 – крышка корпуса; 3 – пакет пьезоэлектрических дисков, работающих в режиме обратного пьезоэлектрического эффекта (блок МСК); 4 – пакет пьезоэлектрических дисков, работающих в режиме прямого пьезоэлектрического эффекта (блок ИВ); 5 – инерционная масса; 6 – объект контроля; 7а, 7б – входные разъемы; 8а, 8б – входные разъемы; 9 – генератор; 10 – усилитель с фильтрами частот; 11 – вольтметр; 12 – электронный коммутатор выхода блока МСК; 13 – электронный коммутатор выхода блока ИВ и выходов его пьезоэлектрических дисков; 14 – коммутационный элемент выходных разъемов 8а и 8б блока ИВ.

Примечание 1 – Элементы 1–5, 7а, 7б, 8а, 8б, 12, 13, 14 на рисунке 4 являются базовыми элементами конструкции ВП ВВД, а элементы 6, 9, 10 и 11 относятся к схеме измерений при реализации процедур самоконтроля.

Новые конструктивные и технические решения предложенной полезной модели ПВ позволяют расширить функциональные возможности МСК ПВ с ВВД и повысить их метрологическую надежность. Они заключаются в следующем:

– блок МСК также, как и блок ИВ, должен работать как в режиме обратного пьезоэлектрического эффекта, так и в режиме прямого пьезоэлектрического эффекта, что позволяет решать задачу контроля правильной работы блока МСК на месте установки ПВ с ВВД с применением тестового сигнала вибрации, создаваемого блоком ИВ, работающего в режиме обратного пьезоэлектрического эффекта, при проведении МСК;

– блок МСК имеет дополнительный выход от пьезоэлектрических дисков блока, подключаемый к дополнительному разъему ПВ с ВВД, для возможности измерения выходного напряжения блока, формируемого в нем под воздействием тестового сигнала вибрации, создаваемого блоком ИВ при его подключении к генератору тестового электрического сигнала при самоконтроле, причем дополнительный выход от пьезоэлектрических дисков блока через дополнительный разъем и электронный переключатель подключаются к контрольному вольтметру;

– блок ИВ включает в себя дополнительные резервные пьезоэлектрические диски, которые по результатам их самоконтроля должны автоматически подключаться в цепь измерений при обнаружении отказа какого-либо из пьезоэлектрических дисков блока, что позволит восстановить МХ ПВ с ВВД при отказе какого-либо из рабочих пьезоэлектрических дисков и тем самым обеспечить безотказную работу в течение всего периода эксплуатации объекта до проведения его капитального ремонта;

– блок ИВ имеет дополнительные выходы от рабочих и резервных пьезоэлектрических дисков блока, подключаемые к дополнительному разъему, для возможности измерения выходного напряжения каждого рабочего и резервного пьезоэлектрических дисков при самоконтроле (выходы от рабочих и резервных пьезоэлектрических дисков через дополнительный разъем и блок электронных переключателей поочередно подключаются к вольтметру);

– вместо тестового электрического сигнала в виде синусоидального напряжения на требуемых частоте и амплитуде или в виде меандра применяется широкополосный сигнал возбуждения (например, шумовой или частотно-модулированный сигнал и т.п.), что позволяет сократить время самоконтроля в 3–5 раз [12].

Процедура МСК предлагаемой модели вибропреобразователя, функционирующей в составе ИИС, реализована за счёт аппаратного (блок МСК ПВ) и программного (в части процедур самоконтроля) обеспечения.

При этом вся информация, полученная в результате МСК как при выпуске из производства, так и при эксплуатации, регистрируется и обрабатывается программным обеспечением для построения

модели ухода погрешности ИК вибрации. Результаты такого моделирования могут быть основанием для оптимизации интервала МСК, а также оценки МЛР.

В случае метрологической неисправности одного или нескольких ПЭ дисков блока ИВ задействуются резервные ПЭ диски, а также проводится автоматическая коррекция значения его коэффициента преобразования.

Необходимым условием при реализации МСК является оценка МХ обоих блоков ПВ (ИВ и/или МСК), проводимая в рамках его первичной поверки. Эти МХ, как правило, указываются в свидетельстве, среди которых основными являются:

1. Коэффициент преобразования (далее – КП) блока ИВ – K_1 (В/м·с⁻²), который рассчитывается по формуле 1:

$$K_1 = \frac{U_{\text{вых1}}}{a_{\text{ax1}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вых1}}$ – амплитуда выходного напряжения блока ИВ, В; a_{ax1} – амплитуда действующего на блок ИВ ПВ виброускорения, м/с².

2. Неравномерность ЧХ КП блока ИВ – γ_{K_1} (%), которая рассчитывается по формуле 2:

$$\gamma_{K_1} = \max \left(\frac{K_{1(i)} - K_{1(\text{баз.ч-та})}}{K_{1(\text{баз.ч-та})}} \cdot 100 \right), \quad (2)$$

где $K_{1(i)}$ – КП на i -й дискретной частоте рабочего диапазона ПВ, кроме базовой частоты; $K_{1(\text{баз.ч-та})}$ – КП на базовой частоте ПВ.

Поскольку ПВ с ВВД имеет два пьезоэлектрических блока, то необходимым условием при реализации МСК является наличие в свидетельстве о первичной поверке ПВ с ВВД сведений не только об основных МХ блока ИВ, но и блока МСК:

1. КП блока МСК – K_2 (В/м·с⁻²), который рассчитывается по формуле 3:

$$K_2 = \frac{U_{\text{вых2}}}{a_{\text{ax2}}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{вых2}}$ – амплитуда выходного напряжения блока МСК, В; a_{ax2} – амплитуда действующего на блок МСК ПВ виброускорения, м/с².

2. Неравномерность ЧХ КП блока МСК – γ_{K_2} (%), которая рассчитывается аналогично КП блока ИВ по формуле 2.

Указанные МХ ПВ касаются работы ПЭ в режиме прямого преобразования и определяются по стандартной процедуре, определенной в ГОСТ Р 8.669–2009 [13].

Поскольку оба пьезоэлектрических блока должны работать также в режиме обратного пьезоэффекта, то при оценке МХ ПВ с ВВД требуется определение дополнительных МХ.

Способы, описанные в [14,15], предполагают нормирование и определение такой характеристики, как напряжение замещения механического возбуждения ПВ $U_{\text{зам}}$. Она определяется в лабораторных условиях при первичной поверке.

Первоначально, используя эталонную виброустановку, определяется величина выходного напряжения с блока ИВ $U'_{\text{вых1}}$ при воспроизведении установкой виброускорения известной величины a , определенной в методике поверки (10 м/с⁻²). Далее, используя генератор синусоидальных сигналов, осуществляется внутренне возбуждение деформации чувствительного элемента, а также фиксируется величина выходного напряжения с блока ИВ $U''_{\text{вых1}}$. Выходное напряжение генератора определяется из условия равенства выходных напряжений в первом и во втором случаях $U'_{\text{вых1}} = U''_{\text{вых1}}$.

Для способа [14] напряжение замещения $U_{\text{зам}}$ равно величине падения напряжения на встроенном резисторе при соблюдении указанного выше равенства. Для способа [15] напряжение замещения $U_{\text{зам}}$ равно величине входного напряжения на ПЭ, работающем в режиме обратного преобразования, при соблюдении указанного выше равенства. Также для способа [15] определяется коэффициент замещения $K_{\text{зам}}$, который определяется как отношение напряжения замещения $U_{\text{зам}}$ к известному значению виброускорения a (10 м/с⁻²).

В рамках реализации процедуры МСК предлагаемой модели ПВ в качестве дополнительных МХ вместо коэффициента замещения $K_{\text{зам}}$ используется обратный КП S (для блоков ИВ и МСК), который является его более общим случаем, и неравномерность ЧХ обратного КП. При условии, что a не является известным значением виброускорения, коэффициент замещения $K_{\text{зам}}$ выражается через обратный КП S по формуле 4:

$$K_{\text{зам}} = \frac{U_{\text{зам}}}{a} = \frac{U_{\text{ex}}}{a} = \frac{1}{S}. \quad (4)$$

1. Обратный КП блока ИВ – S_1 (м·с⁻²/В) рассчитывается по формуле 5:

$$S_1 = \frac{a_{\text{вбл}1}}{U_{\text{вх}1}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{вх}1}$ – амплитуда входного напряжения блока ИВ, В; $a_{\text{вбл}1}$ – амплитуда виброускорения, возбуждаемого внутри ПЭ блока ИВ, м/с².

2. Обратный КП блока МСК – S_2 (м·с⁻²/В) рассчитывается по формуле 6:

$$S_2 = \frac{a_{\text{вбл}2}}{U_{\text{вх}2}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{вх}2}$ – амплитуда входного напряжения блока МСК, В; $a_{\text{вбл}2}$ – амплитуда виброускорения, возбуждаемого внутри ПЭ блока МСК, м/с².

3. Неравномерность ЧХ обратного КП блока ИВ – γ_{S_1} (%) рассчитывается аналогично КП блока ИВ по формуле 2.

4. Неравномерность ЧХ обратного КП блока МСК – γ_{S_2} (%) рассчитывается аналогично КП блока ИВ по формуле 2.

Все эти параметры характеризуют метрологические свойства ПВ, работающих в режиме обратного пьезоэффекта, и также должны определяться в рамках первичной поверки ПВ.

При периодической поверке на месте эксплуатации применяют электрическое возбуждение блока МСК ПВ с ВВД напряжением фиксированной величины с выхода генератора тестового сигнала, подключенного к блоку МСК $U_{\text{вх}2}$, с последующим измерением напряжения с выхода блока ИВ $U_{\text{вх}1}$. Аналогичная процедура проводится для оценки МХ блока МСК, где на блок ИВ подают напряжение с выхода тестового генератора $U_{\text{вх}1}$ с последующим измерением напряжения с выхода блока МСК $U_{\text{вх}2}$.

Поскольку блоки ИВ и МСК механически связаны между собой через инерционную массу, то при передаче механических колебаний от блока МСК к блоку ИВ или наоборот величина параметра вибрации для блока МСК и ИВ будут совпадать:

$$a = a_{\text{вх}1} = a_{\text{вбл}2} \text{ или } a = a_{\text{вх}2} = a_{\text{вбл}1}. \quad (7)$$

Учитывая изложенное выше, значение КП блока ИВ K_1 рассчитывается по формуле 8:

$$K_1 = \frac{U_{\text{вбл}1}}{S_2 \cdot U_{\text{вх}2}}, \quad (8)$$

а величина КП блока МСК K_2 рассчитывается по формуле 9:

$$K_2 = \frac{U_{\text{вбл}2}}{S_1 \cdot U_{\text{вх}1}}. \quad (9)$$

Значения обратных КП – S_1 и S_2 рассчитываются в ходе первичной поверки.

Неравномерность ЧХ для K_1 и K_2 определяется по величине отклонения значений КП на центральных частотах 1/3-октавных рядов от значения на базовой частоте.

Отклонение МХ от нормированных значений складывается из отклонений паспортных значений от нормированных значений и отклонений результатов измерения от паспортных значений. Полученные значения свидетельствуют о годности вибропреобразователей к дальнейшему применению по назначению.

При эксплуатации ПВ с ВВД в составе ИИС объекта блок ИВ работает в режиме прямого пьезоэлектрического эффекта, а блок МСК отключен.

При переходе системы в режим «Метрологический самоконтроль» на объекте контроля, осуществляемом программным способом, на блоки ИВ и МСК попеременно подается тестовый сигнал в требуемом диапазоне частот, который в силу обратного пьезоэлектрического эффекта преобразуется в контрольный сигнал виброускорения.

Полученные значения МХ блоков ПВ с ВВД сравниваются с характеристиками, указанными в паспорте и внесенными в блок памяти ПО ИИС. По результатам сравнения делается заключение о состоянии измерительного канала.

При длительной эксплуатации ПВ с ВВД в составе ИИС целесообразно обеспечить мониторинг значений МХ ПВ, в частности осуществить программное построение модели временного дрейфа погрешности ИК вибрации для возможности изменения интервала между поверками на основе полученных результатов МСК.

Степень отклонения результатов определения МХ блока ИВ, полученных с помощью вибростенда, от результатов, полученных с помощью ВВД, определена опытным путем. Измерительный эксперимент проводился в соответствии с приведенными выше положениями. В качестве сигнала возбуждения использовался синусоидальный сигнал.

На первом этапе (первичная поверка) были определены прямые и обратные КП блоков ИВ и МСК, а также неравномерности их ЧХ с использованием рабочего эталона второго разряда – системы измерительной виброакустической ВС-321 (система ВС-321). Результаты измерений приведены на рисунках 5 и 6.

На втором этапе (моделирование периодической поверки на месте эксплуатации объекта контроля – МСК) с помощью генератора тестового сигнала (канала генератора системы ВС-321) было воспроизведено синусоидальное напряжение со среднеквадратическим значением – 5 В и подано на

вход блока МСК U_{ax2} на всех центральных частотах 1/3-октавного ряда в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц. После чего, используя вольтметр (измерительный канал системы ВС-321), были измерены значения напряжения на выходе блока ИВ U_{ax1} .

Используя значения U_{ax2} и U_{ax1} , а также значения обратного КП блока МСК S_2 , полученные в ходе первичной поверки, по формуле 7 рассчитывается КП блока ИВ K_1 .

На третьем этапе происходит перекоммутация генератора тестового сигнала на блок МСК, а вольтметра – на блок ИВ. По аналогии со вторым этапом осуществляется воспроизведение синусои-

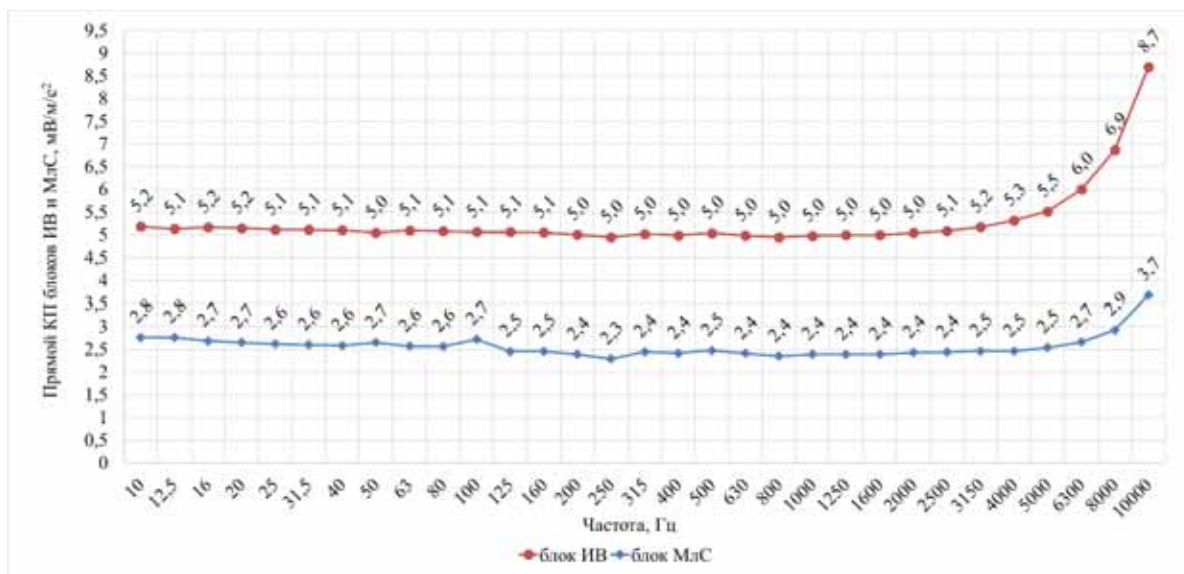


Рисунок 5 – ЧХ КП блоков ИВ и МСК

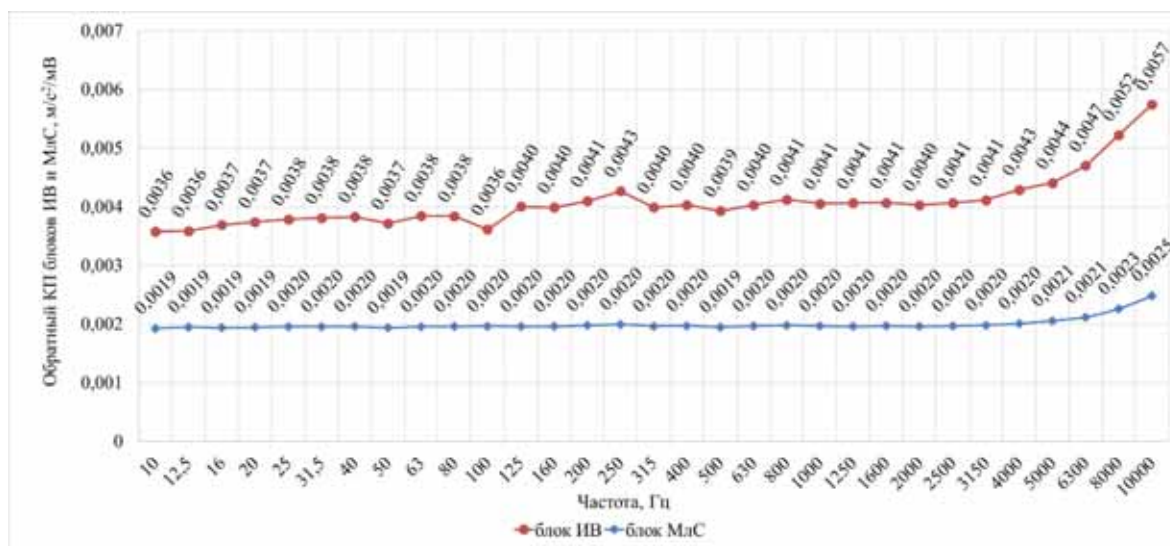


Рисунок 6 – ЧХ обратного КП блоков ИВ и МСК

дального напряжения на вход блока ИВ $U_{вх1}$ и измерение напряжения на выходе блока МСК $U_{вх2}$.

Используя значения $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$, а также значения обратного КП блока ИВ S_1 , полученные в ходе первичной поверки, по формуле 11 рассчитывается КП блока МСК K_2 .

Относительная разность ЧХ КП блоков ИВ и МСК, определенных с помощью системы ВС-321 и с помощью ВВД, представлены на рисунках 7 и 8.

Как видно из рисунков 7 и 8, максимальное значение относительной разности КП, полученных традиционным способом и КП, полученных с помощью самоконтроля: для блока ИВ составило 0,49 %, а для блока МСК составило 0,86 %. При этом доверительные границы относительной погрешности системы ВС-321 в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц составляют $\pm (3-5)$ %.

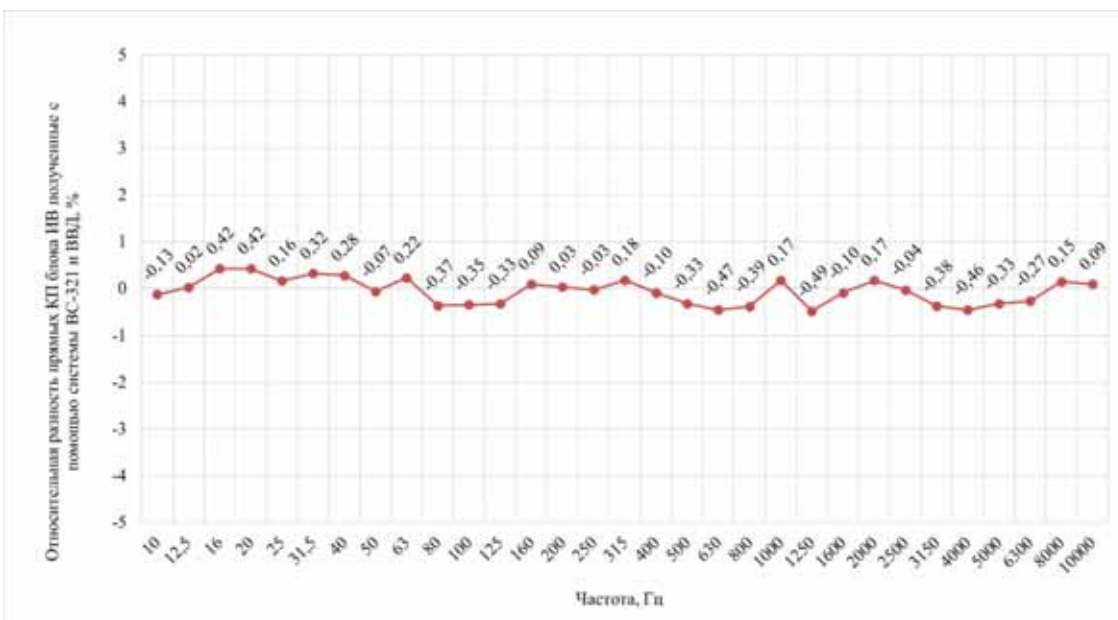


Рисунок 7 – Относительная разность ЧХ КП блока ИВ

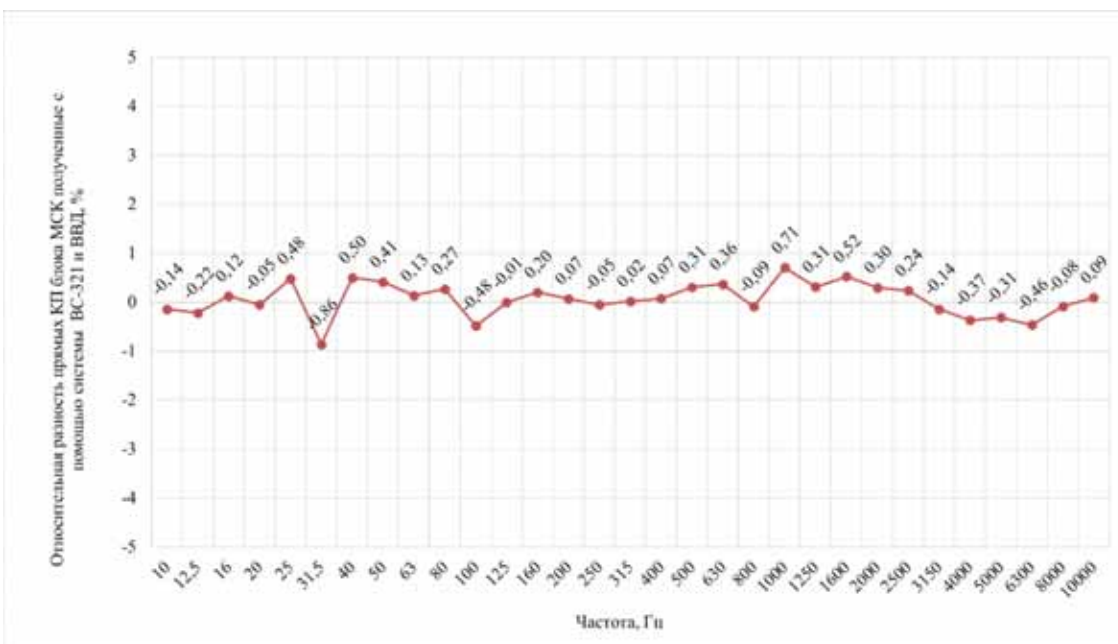


Рисунок 8 – Относительная разность ЧХ КП блока МСК

Реализация предложенных конструктивных и технических решений, а также дополнительных процедур позволит расширить функциональные возможности ПВ с ВВД при самоконтроле на месте эксплуатации, а также контролировать МХ обоих пьезоэлектрических блоков вибропреобразователя, диагностировать отказ пьезоэлектрических дисков блока измерений и автоматически его восстанавливать, значительно сократить время обработки информации при самоконтроле и поверке. Предложенная модель пьезоэлектрических вибропреобразователей с внутренним возбуждением деформации может быть использована в качестве исходной для разработки интеллектуальных вибропреобразователей нового поколения.

Литература:

1. ГОСТ Р 8.596–2002 «ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Общие положения».
2. ГОСТ Р 8.734–2011 «ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля».
3. Мищенко В.И., Кравцов А.Н., Мамлеев Т.Ф. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учётом периодичности поверки. Измерительная техника. 2021 (4). С. 22–27.
4. Способы оценки метрологических характеристик пьезоэлектрических измерительных преобразователей механических колебаний без демонтажа с объектов эксплуатации / Ю.А. Кувыкин, В.В. Супрунюк, А.Г. Максак, А.А. Горбачев // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. Материалы восьмой Всероссийской научно-технической конференции «Судометрика 2022» 25–27 октября 2022 г. СПб. – С. 42–48.
5. Особенности поверки измерительных систем объектов вооружения и военной техники Военно-Морского Флота / А.Г. Максак, А.А. Горбачев, В.В. Супрунюк, Ю.А. Кувыкин // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. Материалы восьмой Всероссийской научно-технической конференции «Судометрика 2022» 25–27 октября 2022 г. СПб. – С. 15–16.
6. Оценка метрологических характеристик пьезоэлектрических вибропреобразователей без демонтажа с объекта контроля / А.Ю. Щедрин, О.А. Кувыкина, Е.В. Чмутин // мат. XXXXVIII НТК Материалы 48-ой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов военных метрологов «Актуальные задачи военной метрологии» / Кубинка, МО, 2023. – С. 278–281.
7. Вариант реализации бездемонтажной поверки пьезоэлектрических вибропреобразователей методом замещения / Ю.А. Кувыкин, А.С. Николаенко // мат. XXXVII НТК молодых ученых – военных метрологов / Мытищи, МО, 2012. – С. 29–32.
8. Бараш В.Я. Пьезоэлектрический измерительный преобразователь вибрации с внутренним возбуждением деформации и способы его калибровки / В.Я. Бараш, М.Ю. Прилепко / Пат. RU 2643685 Заявл. 07.09.2016/ опубл. 05.02.2018. – Бюл. № 4.
9. Иванов Ю.М. Способ поверки пьезоэлектрического гидрофона без монтажа с объекта установки / Ю.М. Иванов, В.В. Супрунюк, Б.В. Косенков, В.А. Ураков / Пат. RU 2439841 Заявл. 25.08.2010/опубл. 10.01.2012. – Бюл. № 11.
10. БИГЮ.408119.040РЭ «Акселерометр пьезоэлектрический. Руководство по эксплуатации», 2018. – 22 с.
11. Селихов А.М. Двухканальный акселерометр / А.М. Селихов, А.В. Орлов, В.Я. Смирнов, Ю.А. Шолин, А.Г. Штейн / Пат. RU 152648 Заявл. 28.01.2015/опубл. 10.06.2015. – Бюл. № 16.
12. Кувыкин Ю.А. Исследование метода определения частотной характеристики вибропреобразователей с применением широкополосной случайной вибрации [Текст] / Ю.А. Кувыкин, И.Н. Соколов, В.А. Кулак // Вестник метролога, 2018, № 2. – С. 8–12.
13. ГОСТ Р 8.669–2009 «ГСИ. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки».
14. Иванов Ю.М. Способ поверки пьезоэлектрического вибропреобразователя без монтажа с объекта установки / Ю.М. Иванов, Б.В. Косенков, В.А. Ураков / Пат. RU 2358244 Заявл. 26.09.2007/опубл. 06.10.2009. – Бюл. № 21.
15. Смирнов В.Я. Способ бездемонтажной поверки пьезоэлектрического вибропреобразователя на месте эксплуатации / В.Я. Смирнов, А.А. Козляковский, А.В. Орлов, Д.В. Скворцов / Пат. RU 2524743 Заявл. 06.11.2012/опубл. 10.08.2014. – Бюл. № 22.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ЧЕРЕЗ НЕПРЕРЫВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ. THEORETICAL FOUNDATIONS OF SOLVING THE NAVIGATION PROBLEM THROUGH CONTINUOUS MEASUREMENT OF THE MAGNETIC INDUCTION VECTOR OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD

Фокина Н.Н., ФГБУ «ГНМЦ» МИНОБОРОНЫ РОССИИ

Фокин А.П., к.т.н., ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

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

Fokin A.P., Military and Air academy of Zhukovsky and Gagarin (VUNTs Air Force «VVA»)

n-fokina@bk.ru, +7 (905) 706-10-42;

fox_314@mail.ru, +7 (905) 569-54-17

Аннотация: Проведен обзор материалов по навигации на основе измерения градиентов магнитного поля Земли. Рассмотрена теоретическая возможность навигации по магнитному полю Земли, основанная на физических принципах магнитной индукции, без использования карт магнитных градиентов.

Abstract: A review of navigation materials based on measuring gradients of the Earth's magnetic field is carried out. The theoretical possibility of navigating the Earth's magnetic field based on the physical principles of magnetic induction, without using maps of magnetic gradients, is considered.

Ключевые слова: навигация, магнитное поле Земли, магнитная индукция.

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

На начальном этапе развития транспортных средств (наземных, воздушных и морских) путники ориентировались по местности, то есть зная систему ориентиров всегда можно было определить свое местоположение. Но с развитием транспорта, увеличение скорости, высоты и дальности маршрутов, возник вопрос навигации, транспортного средства. Ориентация по наземным объектам стала невозможной.

На летательные аппараты, например, стали устанавливать различные измерительные устройства, позволяющие определить параметры движения, и тем самым рассчитать свое местоположение.

Примером таких устройств может служить трубка Пито [1], позволяющая измерить полное давление, создаваемое воздушным потоком, по которому можно рассчитать скорость летательного аппарата относительно воздушного потока.

Мореплаватели ориентировались по звездам, потом начали использовать компас и секстант.

С появлением космических навигационных систем решение задач определения места нахождения упростилось. Имея на борту летательного аппарата навигационный приемник сигналов GPS/ГЛОНАСС, можно постоянно отслеживать свои координаты, а по их приращениям, соответственно, и параметры движения. В настоящее время активно применяются уже 5 глобальных навигационных спутниковых систем, такие как ГЛОНАСС,

GPS, Galileo, «Бэйдоу» и DORIS [2] и 2 региональные навигационные спутниковые системы: IRNSS – индийская навигационная спутниковая система (предполагается для использования только в Индии, первый спутник был запущен в 2008 году, общее количество спутников системы – 7) [3] и QZSS – японская квази-зенитная спутниковая система (доступность в Японии и соседних районах Юго-Восточной Азии, первый QZSS-спутник был запущен в 2010 году, к 2024 году размер спутниковой группировки планируется довести до 7) [4].

Специальная военная операция Российской Федерации на Украине показала слабую помехозащищенность космических навигационных спутниковых систем. Навигационные сигналы легко «глушатся» или «подменяются» системами радиоэлектронной борьбы. При этом следует отметить, что оба процесса широко применяются и в коммерческой сфере в мирное время и получили названия GPS Jamming и GPS Spoofing соответственно [5–7].

Таким образом, возникает необходимость в разработке новых навигационных устройств, основанных на других физических принципах, позволяющих с необходимой точностью определять местоположение и параметры движения объекта.

Навигационная задача – задача по определению координат объекта и параметров его движения, может решаться двумя методами. Первый метод основан на определении своих координат относи-

тельно объекта с известными координатами (измерение взаимной дальности и азимутов), по приращению координат вычисляются параметры движения. Данный принцип навигации заложен в космических навигационных системах, астронавигации, радио маяков и т.д. Второй метод заключается в определении параметров движения объекта, таких как направление движения и скорость, зная свое начальное положение, рассчитываются текущие координаты. Данный принцип навигации заложен в инерциальных навигационных системах, а также применяется в дальней авиации и мореплавание.

Если первый метод основан на определении координат относительно внешнего объекта, то, внеся изменения в подсистему измерения дальности, например, преднамеренное ухудшение/изменение радиосигнала, можно получить неверное решение навигационной задачи.

Второй метод является более защищенным, так как измерения происходят непосредственно на движущемся объекте.

Первый метод имеет более высокую точность, относительно второго, но второй метод является более защищенным от преднамеренных помех.

Для работы подобных навигационных систем, как пример существующих инерциальных навигационных систем, необходимо знать:

- начальные координаты объекта;
- направление движения;
- скорость движения;
- время движения.

Если для определения первого и последнего пунктов можно воспользоваться существующими техническими решениями, то в определении направления и скорости движения возникают трудности. Так, например, у инерциальных навигационных систем, основанных на применении акселерометров, низкая точность в определении скорости движения, а, соответственно, и пройденного расстояния, так как пройденное расстояние находится с через 2-ю первообразную от ускорения, определенного акселерометрами по трем осям. И чем дольше объект находится в движении, тем больше погрешность определения своего местоположения.

Для уменьшения этой погрешности необходимо проводить измерения непосредственно скорости движения объекта относительно неподвижной системы координат, связанной с центром масс Земли.

Атмосфера Земли, а точнее воздух или воздушный поток, не подойдут, так как могут перемещаться относительно поверхности, а, соответственно, и центра масс Земли. А естественное магнитное поле Земли хоть и имеет смещение относительно центра масс, но на протяжении длительности полета любого летательного аппарата может считаться стационарным и жестко связанным с Землей. Таким образом, естественное магнитное поле Земли идеально подходит как некая среда, относительно которой можно определять скорость объекта.

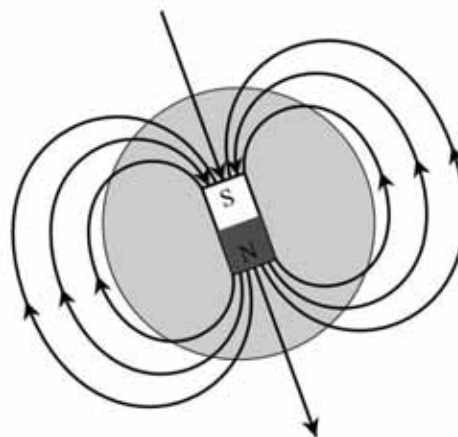


Рисунок 1 – Линии магнитного поля Земли

На основе знаний курса общей физики и параметров магнитного поля Земли [8,9] в настоящий момент разработаны и имеются в продаже различные измерительные устройства и системы, позволяющие определить направление и величину вектора магнитной индукции.

На основе данных устройств уже спроектированы системы для определения навигационных параметров движущегося объекта на основе построения магнитных карт.

В статье [10] проведен детальный анализ информативности и устойчивости параметров магнитного поля Земли на основе реальных данных, полученных в одном и том же месте с интервалом в 12 лет. Разность измеренных значений магнитной индукции за один год на данном участке составила до 7 нТл. Для анализа параметров магнитного поля Земли были вычислены производные модуля индукции магнитного поля по полученным картам. Максимальное значение градиента для рассмотренного участка составило 0,15 нТл/м. Следовательно, такие карты более устойчивы во времени. В статье показано, что

задача навигации летательного аппарата с использованием измерений градиента магнитного поля Земли может быть решена современными средствами измерения магнитного поля.

В статье [11] приводятся результаты экспериментальных исследований по оценке точностных характеристик корреляционно-экстремальных навигационных систем по аномальному магнитному полю Земли для летательных аппаратов. Погрешности экстремальной коррекции магнитных навигационных систем (усредненные данные) составляют 588 м для умеренного (от 40 до 80 нТл) аномального магнитного поля Земли и 410 м для сильного (более 80 нТл) аномального магнитного поля Земли.

В работе [12] на предмет готовности систем навигации по пространственным полям наиболее близкой к практическому применению является система МагКЭНС-1 с использованием модуля вектора напряженности. Ожидаемая погрешность навигации над сушей не более 200 м, над морем – 300–500 м.

В [13] представлен макет комплекса автономной навигации, предназначенный для определения местоположения на маршруте навигации в условиях отсутствия сигналов ГНСС на основе мобильной лаборатории. Обязательным условием функционирования макета является наличие подготовленной навигационной карты параметров магнитного поля Земли. Выполнены измерения составляющих вектора магнитной индукции. СКО ошибки составило 540 м. При точности навигационной магнитной карты – 50 нТл.

Для практического внедрения вышеописанных систем в бортовые навигационные комплексы необходимо обеспечить картографирование магнитного поля Земли.

Необходимо учитывать следующие факторы:

- для точного местоопределения необходимо наличие градиента магнитного поля Земли, при отсутствии изменения магнитного поля на большой площади – навигация невозможна;
- на высотах порядка 500–800 м над уровнем моря градиент магнитного поля Земли практически отсутствует;
- магнитное поле Земли изменяется во времени, поэтому возникает необходимость в создании и постоянном поддержании актуальной базы данных магнитного поля Земли;
- создание детальных карт магнитного поля Земли над территорией других государств

практически невозможна, что сильно ограничивает возможности применения подобных систем.

Все это существенно усложняет применение навигационных систем, основанных на определении градиента магнитного поля Земли. Поэтому данные системы не вышли за рамки лабораторных испытаний.

Основываясь на физических законах магнитной индукции, можно определить составляющие параметры движения объекта в постоянном (неизменном) магнитном поле [14].

Предлагается рассмотреть метод решения навигационной задачи по магнитному полю Земли, не требующий магнитных карт. Для решения навигационной задачи предлагаемым методом необходимо определить:

- 1 – начальные координаты объекта;
- 2 – направление движения;
- 3 – скорость движения;
- 4 – время движения.

Это позволит определить расширенный вектор состояния движения потребителя: $\vec{P} = [x, y, z, V_x, V_y, V_z, t]$, где x, y, z – координаты потребителя, V_x, V_y, V_z – составляющие вектора скорости потребителя (направление и скорость движения), t – текущее время. Если в определении первого и последнего пунктов трудностей не возникает, то в определении направления и скорости движения они есть.

Для определения направления и величины вектора магнитной индукции ($\vec{B}$) предлагается использовать замкнутый плоский контур с током (рамка с током). Ориентация контура в пространстве определяется направлением нормали к контуру. Направление нормали задается правилом правого винта.

Магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие [8], поворачивая ее определенным образом (перпендикулярно вектору магнитной индукции) под действием силы Ампера. Этот результат используется для выбора направления магнитного поля. За направление магнитного поля в данной точке принимается направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к рамке.

Так как рамка с током под действие сил Ампера испытывает ориентирующее действие поля, то у нее возникает вращающий момент. Вращающий

момент сил зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств рамки и определяется по формуле:

$$M = [p_m \cdot B], \quad (1)$$

где p_m – вектор магнитного момента рамки с током.

Для плоского контура с током I :

$$p_m = I \cdot S \cdot n, \quad (2)$$

где S – площадь поверхности контура; n – единичный вектор нормали к поверхности рамки.

Таким образом, направление p_m совпадает с направлением положительной нормали.

Из (1) можно рассчитать количественную характеристику магнитного поля – скаляр магнитной индукции:

$$B = M_{\max} / p_m. \quad (3)$$

Таким образом, для определения направления движения в трехмерном пространстве, необходима система из трех ортогональных рамок с током (рисунок 2).

Во внешнем магнитном поле каждая из них под действием сил Ампера будет определенным образом ориентироваться. Рамка будет стремиться развернуться перпендикулярно вектору магнитной индукции. Благодаря чему, зная направление движения тока в контуре, мы определим направление вектора $\vec{B}$. А рассчитав максимальный вращающий момент рамки с током ($M_{\max}$), мы сможем получить величину (скаляр) магнитной индукции. Следовательно, благодаря такой системе возможно определить направление и количественную характеристику магнитного поля, и соответственно ориентацию объекта в магнитном поле Земли.

Скаляр вектора магнитной индукции можно определить с помощью магнитометра, что намного точнее, чем через вращающий момент рамки с током.

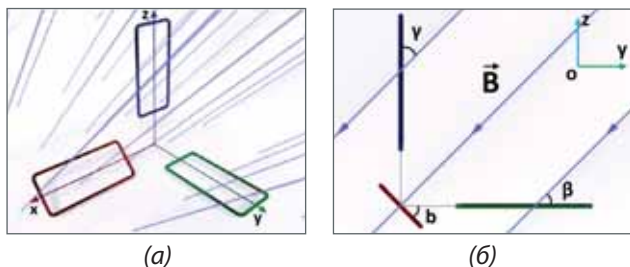


Рисунок 2 – (а) общий вид системы ортогональных рамок; (б) вид системы ортогональных рамок в плоскости YZ

Определив угол отклонения каждой рамки с током из состава ортогональной системы, под действием магнитного поля, относительно центральной оси движущегося объекта, можно определить направление движения объекта относительно постоянного поля Земли, то есть относительно направления на северный полюс. При рассмотрении частного случая, например, в плоскости YZ (рисунок 2 (б)) рамка вдоль оси X отклоняется от оси Y на угол b . Исходя из этого, можно рассчитать угол β между вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и направлением движения объекта вдоль оси Y:

$$\beta = 90^\circ - b. \quad (4)$$

Далее получаем проекцию вектора магнитной индукции на ось Y:

$$B_y = |\vec{B}| \cos \beta. \quad (5)$$

Аналогично вычисляются проекции вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на оси X и Z:

$$B_x = |\vec{B}| \cos \alpha; \quad B_z = |\vec{B}| \cos \gamma, \quad (6)$$

где $\alpha = 90^\circ$ – угол между вектором $\vec{B}$ и осью X, $\gamma = 90^\circ - \beta$ – угол между вектором $\vec{B}$ и осью Z.

Для нахождения угла между вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и направлением движения объекта при совмещении центральной оси объекта с одной из осей, например Y, можно воспользоваться уравнением:

$$\theta = \arccos \frac{B_y}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}}. \quad (7)$$

Определить скорость объекта можно с помощью электродвижущей силы электромагнитной индукции $\mathcal{E}$ в движущемся проводнике. При перемещении проводника длиной l в постоянном магнитном поле свободные электрические заряды внутри него под действием силы Лоренца тоже перемещаются. Возникает разность потенциалов, которая вычисляется по формуле:

$$\mathcal{E} = |\vec{B}| |\vec{v}| l \sin \theta. \quad (8)$$

Из данной формулы выразим скорость движения объекта:

$$|\vec{v}| = \frac{\mathcal{E}}{|\vec{B}| l \sin \theta}. \quad (9)$$

Если считать, что магнитное поле Земли на высотах до 100 км квазистационарно и линии магнитного поля ориентированы от южного полюса

к северному [15], то можно в каждой точке околоземного пространства определить направление и скорость движения объекта.

Следовательно, если на средстве передвижения разместить устройство определения параметров магнитного поля Земли, позволяющие определять скаляр и направление вектора магнитной индукции, и проводник с измерителем электродвижущей силы, то можно определить моментальную скорость данного объекта. Построение участков движения объекта с одинаковой скоростью и направлением и определение времени движения по этим участкам позволит рассчитать пройденный путь, а, соответственно, и точное местоположение относительно начальных координат.

Исходя из вышеописанного, возможно реализовать систему, состоящую из:

1 – навигационной аппаратуры потребителей (определение начальных координат объекта);

2 – системы рамок с источником постоянного тока, позволяющая определить направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ постоянного магнитного поля Земли, то есть направление движения;

3 – проводящего контура, позволяющего определить электродвижущую силу на его концах, для расчета скорости движения;

4 – системы единого времени.

Таким образом, описан альтернативный метод определения расширенного вектора состояния движения потребителя $\vec{P}$ на основе измерений магнитного поля Земли.

Данный метод позволяет определять местоположение и параметры движения объекта без использования карт магнитных градиентов магнитного поля Земли и сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на этапе движения, что делает привлекательным при разработке перспективных помехозащищенных навигационных систем.

Литература

1. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Т.1. Механика. Теплота. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1985. – 606 с.
2. Электронный ресурс: https://ru.wikipedia.org/wiki/Спутниковая_система_навигации (дата обращения 13.02.2024).

3. Электронный ресурс: <https://ru.wikipedia.org/wiki/IRNSS> (дата обращения 13.02.2024).
4. Электронный ресурс: <https://ru.wikipedia.org/wiki/QZSS> (дата обращения 13.02.2024).
5. Электронный ресурс: <https://www.kaspersky.ru/blog/gps-spoofing-protection/22674/> (дата обращения 20.11.2023).
6. Электронный ресурс: <https://habr.com/ru/company/neuronspace/blog/254877/> (дата обращения 20.11.2023).
7. Фокин А.П., Фокина Н.Н. Влияние GPS спуфинга на навигационные приемники сигналов ГНСС – Тезисы докладов X Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2023) – Электронный ресурс: <https://iaaras.ru/meetings/kvno2023/abstracts/fokin/> (дата обращения 12.02.2024).
8. Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов. 11-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 560с.
9. Сивухин Д. В., Общий курс физики, Учебное пособие: Для вузов. В 5 т. Т. 3. Электричество, 5-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ; 2009. – 656 с
10. Каршаков Е. В. Применение измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задаче навигации летательного аппарата // Управление большими системами: сборник трудов. – 2011. – № 35. – С. 265–282.
11. Сазонова Т. В. Экспериментальные исследования точностных характеристик корреляционно-экстремальных навигационных систем по магнитному полю Земли // Альманах современной метрологии. – 2020. – № 4. – С. 86–96.
12. Джанджгава Г. И., Герасимов Г. И., Августов Л. И. Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 74–84.
13. Бобров Д. С. и др. Макет системы навигации по геофизическим полям // Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии. – 2019. – 10 с.
14. Фокин А.П., Мусин А.А., Магнитное поле земли как источник информации для определения параметров движения объектов – Тезисы докладов XLVII конференции молодых ученых и специалистов – военных метрологов ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России / Кубинка, 2022. – С. 208–211.
15. Н.Г. Бочкарев Магнитные поля в космосе. – М.: Наука, 1985. – 207 с.

Прейскурант на 2025 год

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

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/>

