



ISSN 2949-0693

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 4, № 1 • 2025

INNOVATIVE INSTRUMENTATION



ГУАН





ГУАП

Санкт-Петербургский
государственный
университет
аэрокосмического
приборостроения

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 4, № 1 • 2025

INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 4, no. 1 • 2025



SUAI

Saint Petersburg
State University
of Aerospace
Instrumentation

Innovative Instrumentation

Founded in 2022

Founder

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Publisher

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Chief Editor

E. A. Frolova,
D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor,
Director at the Institute of Fundamental
Training and Technological Innovation,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Deputy Chief Editor

S. A. Nazarevich,
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

Editorial Board

A. R. Bestugin, D. Sc., Prof.
A. S. Budagov, D. Sc., Assoc. Prof.
N. A. Zhilnikova, D. Sc., Assoc. Prof.
M. L. Krichevsky, D. Sc., Prof.
N. N. Maiorov, D. Sc., Assoc. Prof.
A. V. Nebylov, D. Sc., Prof.
A. O. Smirnov, D. Sc., Assoc. Prof.
T. M. Tatarnikova, D. Sc., Prof.
V. G. Farafonov, D. Sc., Prof.
E. A. Frolova, D. Sc., Assoc. Prof.
V. F. Shishlakov, D. Sc., Prof.

Scientific Journal

The journal was registered in the Federal Service for
Supervision of Communications, Information Technology
and Mass Media (Roskomnadzor),
PI no. FS 77-83496 from June, 24, 2022

Publication frequency: 6 issues per year

The journal's pages are open for discussion
materials; its content does not necessarily reflect
the views of the founder and the editorial board.

Reprinting of publications from the journal
"Innovative Instrumentation" to foreign editions
is allowed by agreement with the editorial board.

Reference to the journal "Innovative Instrumentation"
is mandatory.

Editorial and publisher's address

The Editorial and Publishing Center,
SUAI, 67, lit. A, Bolshaya Morskaya str.,
Saint Petersburg, 190000, Russian Federation
Tel.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guap.ru
Website: <https://guap.ru/inps>

Editorial Council

Yu. A. Antokhina, D. Sc., Prof.
A. V. Demidov, D. Sc., Prof.
V. V. Ivanov, D. Sc., RAS Corr. Member
G. A. Korzhavin, D. Sc., Prof.
A. A. Ovodenko, D. Sc., Prof.
V. V. Okrepilov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. G. Peshehonov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. I. Shevchenko, D. Sc.
E. V. Shlyakhto, D. Sc., Prof., RAS Academician

Executive editor *O. Yu. Bagieva*

Editor *V. A. Chernikova*

Computer layout and design *Yu. V. Umnitsyna*

Submitted for publication 26.02.2025. Signed for printing: 28.02.2025. Format 60 × 84 1/8.

Printed at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, lit. A, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Free distribution

DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1

ISSN 2949-0693

Инновационное приборостроение

Основан в 2022 г.

Учредитель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Издатель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Главный редактор

Е. А. Фролова,
доктор технических наук, доцент,
директор института фундаментальной
подготовки и технологических инноваций,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Заместитель главного редактора

С. А. Назаревич,
кандидат технических наук, доцент

Редакционная коллегия

А. Р. Бестугин, д-р техн. наук, проф.
А. С. Будагов, д-р экон. наук, доц.
Н. А. Жильникова, д-р техн. наук, доц.
М. Л. Кричевский, д-р техн. наук, проф.
Н. Н. Майоров, д-р техн. наук, доц.
А. В. Небылов, д-р техн. наук, проф.
А. О. Смирнов, д-р физ.-мат. наук, доц.
Т. М. Татарникова, д-р техн. наук, проф.
В. Г. Фарафонов, д-р физ.-мат. наук, проф.
Е. А. Фролова, д-р техн. наук, доц.
В. Ф. Шишлаков, д-р техн. наук, проф.

Научный журнал

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций 24 июня 2022 г.
(Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83496
от 24.06.2022 – печатное издание)

Периодичность издания: 6 номеров в год

Страницы журнала открыты для дискуссионных
материалов; его содержание не обязательно
отражает точку зрения учредителя и редакции.

Перепечатка публикаций из журнала «Инновационное
приборостроение» в зарубежные издания допускается
по согласованию с редакцией.

Ссылка на журнал «Инновационное приборостроение»
обязательна.

Адрес редакции и издателя

Редакционно-издательский центр
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»,
190000, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
Тел.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guap.ru
Сайт: <https://guap.ru/inps>

Редакционный совет

Ю. А. Антохина, д-р экон. наук, проф.
А. В. Демидов, д-р техн. наук, проф.
В. В. Иванов, д-р экон. наук, чл.-корр. РАН
Г. А. Коржавин, д-р техн. наук, проф.
А. А. Оводенко, д-р техн. наук, проф.
В. В. Окрепилов, д-р экон. наук, проф., акад. РАН
В. Г. Пешехонов, д-р техн. наук, проф., акад. РАН
В. И. Шевченко, д-р физ.-мат. наук
Е. В. Шляхто, д-р мед. наук, проф., акад. РАН

Ответственный редактор *О. Ю. Багиева*

Редактор *В. А. Черникова*

Компьютерная верстка и дизайн *Ю. В. Умницыной*

Подписано к печати 26.02.2025. Дата выхода в свет: 28.02.2025. Формат 60 × 84 1/8.
Уч.-изд. л. 11,3. Усл. печ. л. 10,6. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.). Заказ № 47.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно

О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «Инновационное приборостроение» – периодическое научное СМИ, которое издается с 2022 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) с целью консолидации и развития научных знаний и практических наработок в основных сферах его научной деятельности. В журнале «Инновационное приборостроение» публикуются научные обзоры, статьи проблемного и научно-практического характера по следующим направлениям: приборостроение, метрология, стандартизация и управление качеством; радиотехника, инфокоммуникационные технологии и системы связи; кибберфизические системы и цифровая трансформация; фундаментальные науки и прикладные исследования; цифровая экономика и управление организацией.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-83496 от 24.06.2022.

Научная статья

УДК 621.317.71-658.562

DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-5-15

Исследование воздействия внешних условий на качество работы электрических контрольно-измерительных приборов

Алексей Павлович Бобрышов¹

✉ ap.bobryshov@mail.ru, orcid.org/0009-0009-6220-8206, SPIN-код: 2630-5787, Author ID: 1126665

Сергей Валентинович Солёный¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-код: 3957-5891, Author ID: 910148

Владимир Павлович Кузьменко¹

mr.konnny@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0270-4875, SPIN-код: 3159-4202, Author ID: 1111872

Сергей Юрьевич Лач¹

serzh.lach@mail.ru, SPIN-код: 8086-3522, Author ID: 1175021

Геннадий Владимирович Демченко²

em@elf.donntu.ru, SPIN-код: 3467-4428, Author ID: 859586

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация² Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация

Аннотация. Условия эксплуатации и аттестации для электрических контрольно-измерительных приборов являются важными параметрами, непосредственно влияющими на качество проводимых измерений и результаты поверки приборов. Каждое отдельное воздействие оказывает различное влияние на работу устройства, внося или проявляя в различной степени отклонения в измерениях или результатах тестирования. Стандартами и нормативными документами установлены определенные рамки норм для эксплуатации и аттестации, но в данных документах отсутствует описание случаев выхода за данные нормы двух и более параметров внешних воздействий. Цель исследования заключается в изучении особенностей искажения качества работы электрических измерительных устройств при несоблюдении установленных рамок для нескольких внешних условий, а также в анализе воздействия одного условия на изменение нормальных интервалов допустимых значений для другого.

Ключевые слова: контрольно-измерительные приборы, измерительные устройства, внешнее воздействие, поверка, эксплуатация, качество, отклонения

Для цитирования: Бобрышов А. П., Солёный С. В., Кузьменко В. П., Лач С. Ю., Демченко Г. В. Исследование воздействия внешних условий на качество работы электрических контрольно-измерительных приборов // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 5–15. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-5-15.

Original article

Investigation of the impact of external conditions on the quality of operation of electrical test and measurement instruments

Aleksey P. Bobryshov¹

✉ ap.bobryshov@mail.ru, orcid.org/0009-0009-6220-8206, SPIN-code: 2630-5787, Author ID: 1126665

Sergey V. Solyonyj¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-code: 3957-5891, Author ID: 910148

Vladimir P. Kuzmenko¹

mr.konnny@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0270-4875, SPIN-code: 3159-4202, Author ID: 1111872

Sergey Yu. Lach¹

serzh.lach@mail.ru, SPIN-code: 8086-3522, Author ID: 1175021

Gennady V. Demchenko²

em@elf.donntu.ru, SPIN-code: 3467-4428, Author ID: 859586

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation² Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation

Abstract. Operating and certification conditions for electrical test and measurement devices are important parameters directly affecting the quality of measurements and verification results of the devices. Each separate influence has a different impact on the device operation, introducing or manifesting in different degree deviations in measurements or test results. Standards and normative documents establish certain limits of norms for operation and attestation, but these documents do not describe cases when two or

more parameters of external influences exceed these norms. The purpose of this research is to study the peculiarities of distortion of the quality of work of electrical measuring devices at non-compliance with the established framework for several external conditions, as well as to analyze the impact of one condition on the change of normal intervals of permissible values for the other.

Keywords: control and measuring instruments, measuring devices, external influence, verification, operation, quality, deviations

For citation: Bobryshov A. P., Solyonyj S. V., Kuzmenko V. P., Lach S. Yu., Demchenko G. V. Investigation of the impact of external conditions on the quality of operation of electrical test and measurement instruments. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):5–15. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-5-15.

Введение

Воздействие внешних условий на проведение поверки или эксплуатацию электрических контрольно-измерительных приборов (КИП) строго регламентируется стандартами и документами на эксплуатацию приборов. Основными параметрами, которые приводятся в сопровождающих и нормирующих документах, являются температура, атмосферное давление, магнитное поле, вибрация, относительная влажность, частота сети и напряжение питания [1–3]. Межгосударственным стандартом на условия поверки установлены температура окружающей среды, атмосферное давление, относительная влажность, вибрация и магнитное поле. Стандартом на обеспечение единства измерений приведены такие же условия, кроме магнитного поля и вибрации. В ГОСТ 8.497-83 на средства измерений, как и в предыдущем стандарте, отсутствуют требования к магнитному полю и вибрации, но присутствуют нормы напряжения питания, частоты и коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения питания. Стоит отметить, что данные требования правильно будет разделять с учетом конструкции и типа КИП. Воздействие данных параметров способно изменять номиналы компонентов измерительных устройств, нарушать корректность и порядок работы элементов, а также стать причиной выхода приборов из строя.

Задачей исследования является изучение совокупного влияния условий на качество работы электрических измерительных устройств (ИУ). Изменение одного воздействия может сказываться на другом внешнем условии. Такие особенности диктуют необходимость в корректировке допустимых границ для нормальных условий с учетом влияния нескольких воздействий в совокупности. Во многих случаях будут изменяться надежность КИП и, как следствие, качество и достоверность выполняемых измерений.

Исследование и оценка таких требований необходимы для того, чтобы понимать степень влияния внешних условий на поверку и эксплуатацию с точки зрения изменения точности, а именно – проявления отклонений. Необходимо производить вычисление корректирующих коэффициентов, составлять более точные требования

и шкалы качества работы приборов для различных условий эксплуатации ИУ. Дополнительно каждый прибор имеет собственные условия работы, соблюдение которых гарантирует продолжительную и качественную работу КИП. Именно на основе понимания и описания с академической точки зрения влияния внешних параметров на работу прибора формируются и устанавливаются межповерочные интервалы для различных типов КИП [4].

Анализ и исследование влияния внешних условий на точность работы электрических КИП

Проведение процесса поверки является одним из итоговых действий производства электрических КИП. При неправильно построенном процессе аттестации могут проявляться различного рода погрешности, искажающие результаты измерений. Данные неточности варьируются в зависимости от конструктивной системы ИУ. Также, в зависимости от типа прибора, изменяется и проведение самой аттестации. На данный момент широко распространены аналоговые стрелочные КИП магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и ферродинамической систем. За редким исключением – индукционные, тепловые, вибрационные, логометрические. Цифровые ИУ в равной степени эксплуатируются как интегрирующие и сравнивающие [5]. Отсюда можно утверждать, что и условия для проведения поверки тоже обязаны, если не отличаться, то в различной степени оцениваться, например, в моделях подведения итогового качества осуществляемого процесса.

Первым и одним из наиболее важных является условие соблюдения температурного режима при проведении аттестации электрических КИП. Данное требование в качестве рамок допустимых значений к эксплуатации также присутствует в паспорте всех электроизмерительных приборов [6]. Температура внешней окружающей среды влияет на работу ИУ путем изменения его физических, электромагнитных и механических свойств. Одно из влияний описывается через зависимость температуры и со-

противления элементов, которые в виде резистивных объектов используются в конструкции электрических КИП. Также не стоит забывать про изменение собственного сопротивления под действием температуры, проводящих элементов катушек, диодов, проводников. Зависимость изменения сопротивления описывается следующим выражением:

$$R_{\text{итог}} = R_{\text{нач}}(1 + \alpha(t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}})),$$

где $R_{\text{итог}}$ – итоговое значение сопротивления исследуемого элемента; $R_{\text{нач}}$ – изначальное, номинальное сопротивление элемента при рабочей температуре; α – температурный коэффициент сопротивления, зависящий от материала исследуемого элемента; $t_{\text{кон}}$ – конечное значение температуры, или температура, при которой эксплуатируется элемент; $t_{\text{нач}}$ – изначальное, или нормальное, значение температуры, относительно которого проводится исследование. Единица в зависимости характеризует 100 % для сохранения начального математического значения температуры.

Проводя анализ данной зависимости, можно отметить, что при увеличении температуры итоговое сопротивление повышается, а при ее понижении уменьшаются резистивные свойства элемента. Также, проводя исследование температурных коэффициентов сопротивления, можно сказать, что при большом значении сопротивлений изменение данного параметра сильно снижается [7]. Объяснение такому изменению можно найти, учитывая влияние температуры на движение электронов в проводнике. Повышение температуры влияет на атомы в решетке проводника таким образом, что последние начинают колебаться более активно. Данное явление приводит к увеличению числа столкновений свободных электронов с атомами решетки, повышая рассеяние, что приводит к росту сопротивления. Это явление наблюдается как при постоянном, так и при переменном токе. При этом ток в цепи уменьшается, даже в случае проявления скин-эффекта, основное влияние температуры все равно остается.

Температура влияет не только на электромагнитную составляющую, но и на механическую. Ярким примером является пружинка, используемая для создания противодействующего момента неподвижной катушки. Катушка прибора и рамка взаимодействуют электромагнитно. Подвижная катушка при помощи пружины возвращается в свое исходное положение, т. е. при отклонении пружина создает *момент*. Неподвижная катушка, генерируя поле, взаимодействует с полем в подвижной катушке, и отсюда появляется *мо-*

мент электромагнитный. Упругость пружины изменяется, уменьшаясь при высоких температурах и увеличиваясь при низких, в таких случаях изменяется и момент.

Дополнительно при изменении температуры изменяется давление внутри КИП, увеличиваясь при повышении температуры и уменьшаясь при снижении. Данные факты описываются законами Бойля – Мариотта, Гей – Люссака и общим уравнением состояния идеального газа. Само по себе давление оказывает воздействие на работу КИП в основном через изменение физических свойств элементов прибора или при нарушении их нормального функционирования между собой [8]. Можно изменять момент отклонения стрелки путем воздействия на пружину и общий механизм отклонения. Меньшее воздействие на полупроводниковые элементы можно оказывать, изменяя сопротивление: данный эффект ничтожно мал, и ощутимую разницу в изменениях можно заметить только при значительно высоком изменении давления. Стоит отметить, что в конструкцию многих стрелочных ИУ входит система успокоения колебания стрелки прибора для более четкой и быстрой индикации измеряемой величины. Данная система бывает механической и магнитной. В случае механической основная функция успокоения разделяется на жидкостную и воздушную. Колебания стрелки снижаются за счет сопротивления движения специального крыла в камере, наполненной жидкостью или воздухом [9]. Для магнитной системы используются диск и постоянный магнит, при вращении в диске наводятся токи, противодействующие магнитному полю, что вызывает тормозящий эффект при сильных колебаниях. При нормальном режиме работы такие механизмы снижают колебания стрелки от изменения параметров сети или внешней вибрации. При увеличении давления сопротивление движению крыла механизма успокоения будет увеличиваться, что приведет к ухудшению демпфирования колебаний стрелки, причиной которых могут стать отклонения в электрических измерениях.

Вибрация является внешним воздействием на измерительный прибор, преимущественно влияя на работу аналоговых стрелочных КИП. Работа стрелочных ИУ построена на отклонении индикационной стрелки под воздействием генерируемого магнитного поля. Ток, протекающий в катушке, снижается входным сопротивлением прибора, отчего сила момента достаточно мала, и воздействие внешней вибрации в виде толчка оказывается значительным для внесения изменения в баланс между моментами вращения и противодействия пружины. Внешнее

воздействие может быть в значительной степени сильным даже для приборов, оснащенных конструкцией для снижения или полного исключения колебаний. При сильных внешних воздействиях может быть нарушена механическая целостность элементов КИП, влияющая на корректность фиксации и отображения измеряемой электрической величины. Такие изменения могут проявляться после продолжительного воздействия вибрации на прибор, например, на изменение момента пружины через ее чрезмерное растяжение или сжатие, а также нарушение целостности элементов в случае некачественной пайки электронных компонентов на плату или образования контакта между проводящими элементами под действием вибрации. Конечно, данное воздействие более характерно к проявлению отклонений для аналоговых стрелочных КИП, но, несмотря на это, может оказывать воздействие и на цифровые устройства. Колебания могут иметь различную природу, в том числе гармоническую, если учитывается монотонная работа устройства [10]:

$$F = F_0 \sin \omega t,$$

$$F = F_0 \cos \omega t,$$

где F_0 – это сила колебаний; \cos , \sin характеризуют форму колебаний по времени; F – итоговая сила колебаний. Как говорилось выше, данные уравнения описывают монотонные колебания, связанные с особенностью работы или внешних сил, обладающих постоянством.

Магнитное и электромагнитное поля оказывают прямое влияние на работу как аналоговых стрелочных, так и цифровых ИУ. Такое воздействие проявляется в разной степени, вызывая проявление отклонений в проводимых электрических измерениях. Источниками электромагнитного воздействия могут быть другие приборы, генераторы или некорректная работа данных аппаратов. Правильное расположение электроаппаратов с учетом электромагнитных свойств называется электромагнитной совместимостью. Во многих случаях существует необходимость близкого расположения устройства, чувствительного к помехам, и прибора, являющегося источником электромагнитного излучения. В таких случаях осуществляется сборка, с учетом комбинации приборов таким образом, чтобы исключить влияние электромагнитного поля. Дополнительно может рассматриваться применение экранов для электромагнитной защиты.

Рассматривая принцип влияния электромагнитного поля на электроизмерительные КИП, стоит понимать, что воздействие на аналоговые

стрелочные и цифровые ИУ будет сильно различаться физически. Для приборов стрелочной системы воздействие направлено, в первую очередь, на электромагнитные поля, генерируемые в катушках КИП, и на поля постоянных магнитов. Данная зависимость объясняется законом Ампера о влиянии магнитного поля на проводник с током. При этом оба магнитных поля имеют свои источники, как правило, это проводники с током. Для таких случаев взаимодействие между источниками описывается несколькими уравнениями, например [11]:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \Delta L}{2\pi r},$$

где F – результирующая сила воздействия двух источников; μ_0 – магнитная постоянная; I_2 – ток внешнего источника воздействия магнитного поля; I_1 – ток, протекаемый в электрическом КИП; ΔL – длина проводника КИП; r – расстояние между источниками;

$$F = BIL \sin \alpha,$$

где F – действующая сила на ИУ; B – магнитная индукция источника поля; I – ток в КИП; L – длина проводника КИП; $\sin \alpha$ – угол между индукцией и направлением тока в ИУ. Этим уравнением описано воздействие внешнего магнитного поля на проводник с током, которым выступает КИП. Из данной зависимости понятно, что источники с одним направлением тока и поля притягиваются и, наоборот, отталкиваются, если токи и поля имеют разное направление. Применяя данную теорию на практическую плоскость конструкции электрического КИП аналоговой стрелочной системы, можно понять, что внешнее магнитное поле оказывает воздействие напрямую на вращающуюся катушку прибора, нарушая взаимодействие полей в ИУ. Таким образом, баланс моментов будет нарушаться и увеличивать угол отклонения или уменьшать его, в зависимости от места расположения источника внешнего воздействия магнитного поля, что влечет за собой выявление погрешностей в КИП.

В случае влияния переменного магнитного поля в катушках КИП может индуцироваться электродвижущая сила, ток которой будет изменять электромагнитное поле катушки ИУ, увеличивая или уменьшая его, тем самым внося значительные изменения в баланс моментов. Данное явление также описывается базовыми законами Фарадея и Ленца.

В продолжение исследования физического влияния изменяющегося электромагнитного или

магнитного поля в случае компонентной базы электрических КИП, что более свойственно для приборов цифровой системы, можно отметить, что магнитное поле оказывает воздействие на физические свойства компонентов через электромагнитную индукцию. При этом в конструкции на токоведущих элементах и компонентах электронной базы могут индуцироваться токи и заряды, которые будут влиять на работу прибора, изменяя его номиналы и искажая результаты измерений. На многие элементы влияние внешнего поля окажет воздействие на структуру, тем самым изменяя номинальные характеристики. В некоторых случаях при продолжительном воздействии значения номиналов компонентной базы элементов ИУ могут измениться навсегда. Данное явление приведет к смещению нулевого значения прибора, тем самым обеспечивая фальсификацию значений даже в условиях отсутствия измеряемого сигнала.

Еще одним ключевым параметром в работе электрического КИП является влажность. Данная величина значительно связана с температурой и давлением: в совокупности превышение данных значений может привести к достаточно внушительным искажениям измерений. Макросреда электроизмерительного ИУ важна, повышенная влажность может стать источников влаги внутри аппарата, тем самым изменяя проводящие свойства элементов, а также способствуя коррозии элементов при продолжительном воздействии. Слишком сухая среда, в свою очередь, может способствовать возникновению зарядов и замыканий между элементами КИП. Для электроизмерительной аппаратуры существует так называемая предпочтительная рабочая область, описывающая, в каком именно диапазоне зависимости температуры и влажности оптимальна работа прибора [1–3, 6]. Как было сказано ранее, повышение относительной влажности может стать причиной

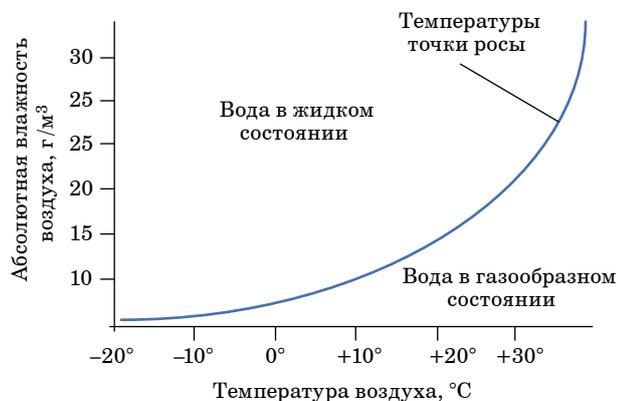
образования конденсации, при снижении температуры воздуха с поддержанием влажности существует риск отказа устройств, а при превышении или снижении двух параметров будет значительно снижаться срок службы электроаппарата. Показатель влажности является взаимосвязанной величиной, описывающейся как функция между температурой и абсолютной влажностью воздуха. Зная относительную влажность помещения, а также в зависимости от температуры, до которой нагревается при работе КИП, возможно определить так называемую точку росы, являющуюся областью, при которой на поверхности или в конструкции прибора будет образовываться влага (рис. 1).

Абсолютная влажность определяет плотность влаги в воздухе, иными словами, насколько много влаги в воздухе, характеризуется количеством влаги на кубический метр пространства. Относительная влажность характеризует отношение парциального давления к давлению насыщенного пара и выражается в процентах.

Таким образом, можно сделать вывод, что сама по себе влажность является ограничивающим параметром для работы КИП в совокупности с давлением и, в большей степени, с температурой окружающей среды. Достаточная влага может оказать воздействие на успокоительные механизмы электрических ИУ аналоговой стрелочной системы. Также образование конденсата может стать причиной выхода из строя прибора или значительного изменения номинальной работы устройства, как цифровой, так и аналоговой стрелочной системы. Чрезмерная влажность может способствовать образованию замыкания между двумя соседствующими проводящими элементами, что может вызвать отклонения в работе электрического КИП.

Дополнительные требования к условиям проведения поверки КИП

Рассматривая дополнительные требования, предъявляемые к условию проведения аттестации электрических КИП, стоит также рассмотреть номиналы питающей электрической сети, а именно – параметры ее качества. Корректная фиксация данных исследуемыми электрическими ИУ зависит от скачков электросети, ее способности к сохранению и поддержанию устойчивых параметров. Нелинейность, проявляющаяся в ходе проведения измерений, может стать причиной проявления субъективных погрешностей в случаях цифровых КИП, ошибки параллакса или увеличения погрешности интерполяции для стрелочных аналоговых ИУ [12]. Дополнительно в случае скачков невозможно будет установить



• Рис. 1. График зависимости абсолютной влажности от температуры
 • Fig. 1. Graph of the dependence of absolute humidity on temperature

точные точки проведения аттестации, что является значительной проблемой для аналоговых стрелочных устройств.

К данным параметрам также стоит отнести уровень напряжения, форму питающей сети и частоту. Форма и уровень напряжения влияют на точность измеряемой величины, а ее нелинейность может вызвать динамику изменения измеряемого параметра, что может стать проявлением ошибки с точки зрения фиксации значения. Пульсации электрической величины будут изменять динамически измерения, что приведет к значительному затруднению регистрации значений.

Параметр частоты является более «тонким» параметром с точки зрения соблюдения его точности. Стандартом на нормы качества электросети устанавливается требование для частоты, разделяющееся на две нормы: нормально допустимое и предельно допустимое отклонение частоты. В первом случае величина отклонения составляет $(\pm 0,2)$ Гц, во втором – $(\pm 0,4)$ Гц [12]. При внушительном отклонении данных показателей может возникнуть нарушение синхронизации работы электроаппаратов. Для электрических КИП изменение частоты влияет на чувствительность и точность работы устройств, в процессе может возникнуть резонансный эффект, являющийся причиной изменения амплитуды сигнала, в некоторых случаях кратковременный. Особо важное внимание стоит уделить импедансу и реактивным компонентам, поскольку нарушение номинала частоты может спровоцировать изменение комплексного сопротивления. Превышение частоты влечет за собой увеличение индуктивности и уменьшение сопротивления конденсаторной составляющей. Данные параметры в значительной степени влияют на измерения тока и напряжений.

Для электрических КИП цифровой системы данное изменение вовсе является критичным, поскольку напрямую влияет на обработку и фиксацию данных измерений. Также не стоит забывать, что для работы цифровых ИУ необходимо подключение питания, требующего значения частоты в 50 Гц. Нарушение данного параметра может вызвать не только искажения при фиксации измерений, но и вовсе стать причиной выхода из строя электрического КИП.

Степень влияния воздействия на проявление отклонений в работе электрических КИП

Установленные в стандартах и паспортах условия проведения поверки и эксплуатации КИП имеют различную степень влияния на работу

электроизмерительных ИУ и, как следствие, проявление погрешностей. Для каждого отдельного параметра установлены определенные рамки допустимых значений. В данных нормативных документах на эксплуатацию и проведение поверки отсутствует описание на случаи воздействия двух и более внешних факторов на работу ИУ. Особенно ярко это выражается в изменении параметров влажности и температуры в совокупности. Основной причиной влияния влажности является образование конденсата, в случаях повышения температуры точка росы будет изменяться. Таким образом, при допустимом значении влажности, за счет изменения температуры, будет снижаться или увеличиваться максимально допустимый предел влажности.

Ключевым является вопрос, насколько сильно описанные условия влияют на качество проведения поверки, а также насколько точные результаты измерений будет отражать прибор при работе в данных условиях. В глобальном отношении существует необходимость представления разграничений по степени важности соблюдения и поддержания параметров внешнего воздействия, в том числе с учетом типа системы ИУ. Для начала стоит определиться с перечнем параметров. Несомненно, в данный список входят температура, электромагнитное поле, давление, влажность и вибрация. Напряжение питающей сети, частота и коэффициент искажения синусоидальной кривой стоит рассмотреть отдельно, поскольку влияние данных величин искажает измеряемую величину, но не работу прибора. Проявляемые при этом отклонения сложно отнести к ненормальному функционированию устройства, но, как ошибку работы по причине низкого качества электроэнергии, стоит отнести в итоговый список.

Изменение температуры окружающей среды является самым важным параметром в работе электрического КИП. Данный параметр является наиболее важным, поскольку влияет на наибольшее количество конструктивных элементов, как аналоговых стрелочных ИУ, так и приборов цифровой системы. Последние устройства более устойчивы к изменению температуры в сравнении с классическими аппаратами. Дополнительно высокая степень влияния подтверждается по причине значительно высокой степени воздействия на работу КИП при комбинированном влиянии температуры с влажностью, давлением.

Зададимся параметрами, что в случае превышения, установленного паспортом значения влажности, может проявиться конденсат и будут изменяться номиналы и режимы работы внутренних элементов ИУ, таких как резисторы, транзисторы и т. п. В качестве зависимости изменения

температуры возьмем представленную зависимость между сопротивлением и температурой. При этом зададимся двумя случаями: превышение и снижение температуры окружающей среды. Система ИУ будет выбрана цифровая, в качестве параметров внешнего воздействия возьмем промышленный объект, расположенный в подземной системе на уровне -50 м над уровнем моря, установим номинальный температурный режим в $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и абсолютную влажность в $10\text{--}12\text{ г/м}^3$. Повышение температуры примем до значения $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, снижение рассмотрим до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим воздействие температуры на внутреннее сопротивление электрического КИП. Зададим сопротивление используемого в конструкции чип-резистора в 470 Ом . Температурный коэффициент сопротивления для чипа резисторов является наиболее низким в пределах от 2 до 5 К^{-1} , таким образом, изменение сопротивления при достижении температуры 40 и $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет составлять:

$$R_{+40^{\circ}\text{C}} = 470 \cdot (1 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot (40 - 25)) \Rightarrow 470,03525\text{ (Ом)},$$

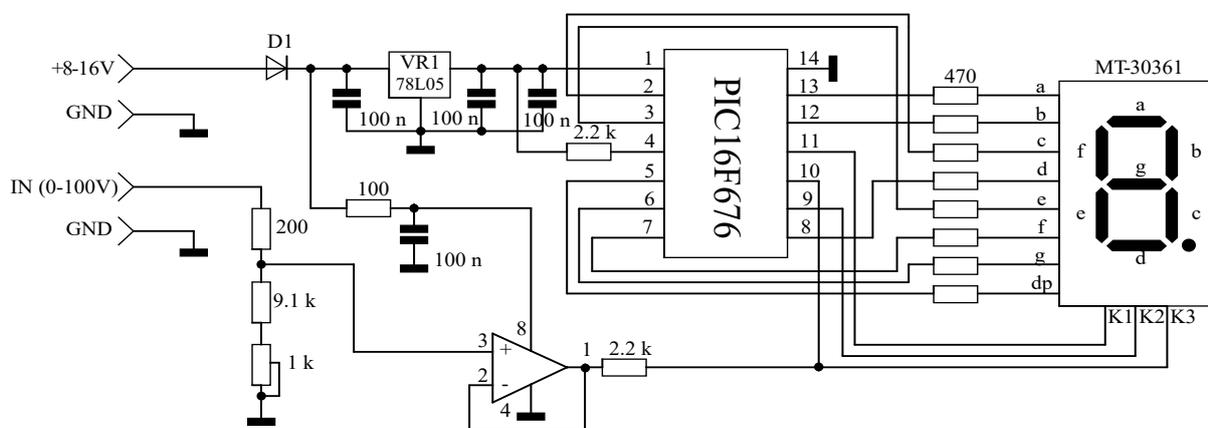
$$R_{-10^{\circ}\text{C}} = 470 \cdot (1 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot (-10 - 25)) \Rightarrow 469,91775\text{ (Ом)}.$$

Итоговое значение сопротивления искажается на $0,03525$ и $0,08225\text{ Ом}$ только одного резистора. При этом стоит отметить наличие в схеме цифрового КИП целого набора сопротивлений, необходимых для снижений значения тока. В совокупности с работой операционных усилителей, генераторов опорных напряжений и тому подобных устройств, используя набор сопротивлений, можно выстроить логическую систему (рис. 2) [5]. При помощи аналого-цифрового преобразователя и счетчика осуществляется перевод измеряемой величины в цифровой код, фиксируя который, процессор осуществляет отображение полученной величины на экран прибора.

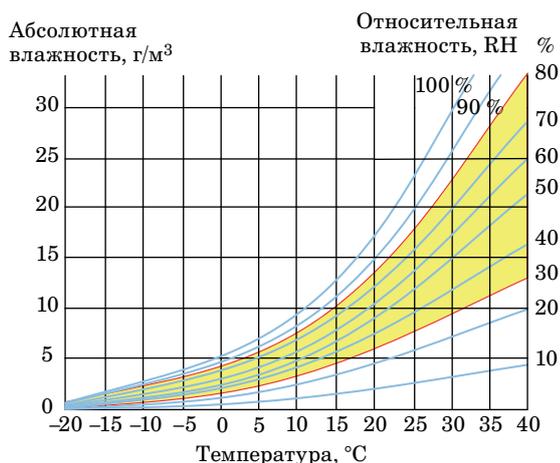
Используемый в конструкции цифрового КИП аналого-цифровой преобразователь под действием температуры увеличивает или уменьшает значение выдаваемого кода [13]. Дополнительное влияние температура оказывает на работу источника опорного напряжения и счетчик сигналов, также имеющие в своей конструкции сопротивления. Таким образом, итоговое воздействие температуры на работу компонентов цифрового КИП может объединиться и обеспечить значительное искажение результатов измерения. Данное искажение полностью нарушит корректную работу системы значений, что обеспечит проявление цифровой погрешности отсчета, в совокупности с отклонением квантования, проявляющимся в КИП согласно разнице между реальной измеряемой величиной и ступенями системы ИУ.

Для номинальных рабочих $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и заданных $10\text{--}12\text{ г/м}^3$ абсолютной влажности, согласно графику зависимости между температурой и влажностью (рис. 3), КИП будет находиться в допустимой области относительной влажности от 50 до 60% , что говорит о парообразном состоянии жидкости в воздухе.

При повышении окружающей температуры эксплуатации до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, с учетом сохранения заданных $10\text{--}12\text{ г/м}^3$ абсолютной влажности, относительная влажность изменится до менее 30% (рис. 3). Данное явление свидетельствует об осушении воздуха и при продолжительном воздействии может стать причиной накопления статического заряда, ввиду работы КИП, а также накопления значительного объема пыли, как следствие загрязнение прибора, в случае низкой пылевлагозащиты. Статический заряд может возмущаться на плате «заряды-разряды» и сбивать работу прибора, тем самым на нестабильной основе стать причиной случайных погрешностей. В случае загрязнения накопившиеся объемы пы-



• Рис. 2. Принципиальная электрическая схема цифрового вольтметра
 • Fig. 2. Circuit diagram of the digital voltmeter



• Рис. 3. График зависимости между температурой, абсолютной влажностью и относительной влажностью

• Fig. 3. Graph of the relationship between temperature, absolute humidity and relative humidity

ли могут повысить внутреннюю температуру прибора, что увеличит ее воздействие на прибор, а также в большей степени снизит влажность. Дополнительно перегретый воздух будет с меньшей эффективностью отводить тепло, что в совокупности с накоплением пыли влечет за собой более эффективный нагрев КИП и, как следствие, значительное изменение электрических параметров прибора [14].

При снижении температуры до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, также с учетом сохранения заданного уровня влажности в $10\text{--}12\text{ г/м}^3$, изменится абсолютная влажность, а показания относительной влажности будут выше 100 % (рис. 3) и превышать температуру точки росы (рис. 1), что говорит о возникновении влаги на КИП. Жидкость, образуемая на корпусе ИУ, при низком значении пылевлагозащиты может проникнуть и попасть на токоведущие части прибора и замкнуть отдельные проводящие элементы, что может привести к выходу из строя работы ИУ. Также при интенсивной работе прибора при высоких энергетических показателях тока и напряжения нагрев может происходить от комплектующих ИУ. Разница между температурой окружающей среды и нагревом элементов прибора может вызвать выравнивание энергетических параметров, но также вызовет конденсацию на корпусе прибора, что может стать значительным риском проникновения влаги на токоведущие части прибора и, как следствие, причиной выхода устройства из строя.

При этом стоит учитывать расположение выбранного промышленного объекта под землей на уровне -50 м над уровнем моря, что говорит

о повышении температуры окружающей среды в среднем на $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также учитывая замкнутое пространство, при работе большого числа аппаратов, температура будет повышаться значительно, а в условиях низких температур, например, на Северном полюсе, температура под землей около поверхности будет также низкой. Геотермический градиент показывает, насколько изменяется температура в земных недрах, – данный параметр также необходимо учитывать при выборе аппаратов, эксплуатируемых в различных внешних условиях [15].

Заключение

Результатом проведенного исследования является оценка степени воздействия внешних условий на работу электрических КИП. Как показывают теоретические результаты анализа, влияние отдельных внешних параметров в различной степени отличаются друг от друга. Стоит отметить, что данные воздействия имеют совершенно другой характер в зависимости от типа системы ИУ. Например, воздействие вибрации на стрелочные КИП оказывает более сильное влияние в сравнении с приборами цифровой системы, то же самое можно сказать и про влияние внешнего магнитного поля.

Нарушения условий эксплуатации по двум и более параметрам вызывают более значительные отклонения в работе приборов. Причина может скрываться как в суммировании влияний, так и в изменении номиналов при выходе за определенные установленные рамки эксплуатации. Данный факт подтверждается изменением температурного режима с сохранением заданной абсолютной влажности. Отклонение от норм термических режимов сбивает допустимые нормы влажности, установленные регламентирующими документами. Такие влияния возможно отслеживать и учитывать при помощи различного рода математических моделей, построенных на основе физического воздействия на конструкцию приборов. Также возможно использовать квалитметрические модели с учетом заранее заданных данных степени воздействия на качество. Подобные инструменты будут полезны с точки зрения оценки качества выполняемых функций в различных местах эксплуатации приборов. Например, под землей или на высоте больше уровня моря изменяются внешние параметры температуры, магнитного поля, влажности, точки кипения воды, вибрации, давления и т. п.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 8.395-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. М.: Стандартиформ, 2008. 6 с.
2. ГОСТ 8.497-83. Государственная система обеспечения единства измерений. Амперметры, вольтметры, ваттметры, варметры. Методика поверки. М.: Изд-во стандартов, 2005. 10 с.
3. ГОСТ Р 8.656-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений показателей качества электрической энергии. Методика поверки. М.: Стандартиформ, 2019. 20 с.
4. Приказ Росстандарта от 02.07.2019 № 1502 (ред. от 24.04.2024) «Об утверждении рекомендуемых предельных значений интервалов между поверками средств измерений». URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rosstandarta-ot-02072019-n-1502-ob-utverzhdanii-rekomenduemykh/> (дата обращения: 14.11.2024).
5. Бобрышов А. П., Солёный С. В., Кузьменко В. П. Анализ и оценка ключевых конструктивных особенностей, определяющих качество электрических контрольно-измерительных приборов // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 4, № 4. С. 5–13. Doi: 10.31799/2949-0693-2024-4-5-13.
6. Приборы электроизмерительные цифровые PD194E. Руководство по эксплуатации. URL: <https://www.ksmeter.ru/upload/iblock/186/Руководство%20по%20эксплуатации%20PD194E.pdf> (дата обращения: 20.11.2024).
7. Лугин А. Н. О нормировании температурного коэффициента сопротивления тонкопленочных резисторов высокой точности // Надежность и качество: Труды Междунар. симп. 2007. Т. 2. С. 75–76.
8. Chusseau L., Arnaud J., Philippe F. On the ideal gas law. 2018. 14 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/51916946_On_the_ideal_gas_law (дата обращения: 21.11.2024).
9. Шишкина Ю. М. Специфика устройства электродинамических и электромагнитных измерительных приборов и основные принципы их работы // Актуальные исследования. 2019. С. 185–187.
10. Мишин В. А., Новиков А. А., Тихоненков В. А. Динамика статически неуравновешенной подвижной части электроизмерительного прибора в задаче автоматизации ее балансировки // Приклад. мат. и механика. 2004. № 6. С. 167–171.
11. Уайт Д. Р. Ж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средства и непреднамеренные помехи. Вып. № 2: Внутрисистемные помехи и методы их улучшения. М., 1978. 269 с.
12. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартиформ, 2014. 16 с.
13. Майоров А. В., Светлов А. В. Метод снижения температурной погрешности аналого-цифровых преобразователей информационно-измерительных систем на основе «Систем на кристалле» // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. 2015. Т. 1, № 3. С. 149–154.
14. Thermodynamic properties of air from 60 to 2000 K at pressures up to 2000 MPa / M. D. Panasiti [et al.] // International journal of thermophysics. 1999. Vol. 20. P. 217–228.
15. Encyclopedia of astrobiology / M. Gargaud [et al.]. Berlin; Heidelberg; Springer, 2011. 1853 p. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_643.

REFERENCES

1. GOST 8.395-80. State system for ensuring the uniformity of measurements. Normal measurement conditions during verification. General requirements. Moscow: Standartinform; 2008. 6 p. (In Russ.).
2. GOST 8.497-83. State system for ensuring the uniformity of measurements. Ammeters, voltmeters, wattmeters, varmeters. Verification methodology. Moscow: Publishing House of Standards; 2005. 10 p. (In Russ.).
3. GOST R 8.656-2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Measuring instruments for electrical energy quality indicators. Verification methodology. Moscow: Standartinform; 2019. 20 p. (In Russ.).
4. Order of Rosstandart dated 02.07.2019 No. 1502 (as amended on 24.04.2024) “On approval of the recommended limit values of intervals between verifications of measuring instruments”. Available from: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rosstandarta-ot-02072019-n-1502-ob-utverzhdanii-rekomenduemykh/> [Accessed 11 November 2024].
5. Bobryshov A. P., Soleny S. V., Kuzmenko V. P. Analysis and assessment of key design features that determine the quality of electrical control and measuring instruments. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2024;4(4):5–13. (In Russ.). Doi: 10.31799/2949-0693-2024-4-5-13.
6. Digital electrical measuring instruments PD194E. Operation manual. Available from: <https://www.ksmeter.ru/upload/iblock/186/Руководство%20по%20эксплуатации%20PD194E.pdf> [Accessed 20 November 2024].

7. Lugin A. N. On the normalization of the temperature coefficient of resistance of high-precision thin-film resistors. Reliability and quality: Proceedings of the International symposium, 2007, vol. 2, pp. 75–76. (In Russ.).
8. Chusseau L., Arnaud J., Philippe F. On the ideal gas law. 2018. 14 p. Available from: https://www.researchgate.net/publication/51916946_On_the_ideal_gas_law [Accessed 21 November 2024].
9. Shishkina Yu. M. Specifics of the device of electrodynamic and electromagnetic measuring devices and the basic principles of their operation. Current research. 2019, pp. 185–187. (In Russ.).
10. Mishin V. A., Novikov A. A., Tikhonenkov V. A. Dynamics of a statically unbalanced moving part of an electrical measuring device in the problem of automating its balancing. Applied mathematics and mechanics. 2004;(6):167–171. (In Russ.).
11. White D. R. Zh. Electromagnetic compatibility of radio electronic equipment and unintentional interference. Is. No. 2: Intra-system interference and methods for improving it. Moscow; 1978. 269 p. (In Russ.).
12. GOST 32144-2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standards for electrical energy in general-purpose power supply systems. Moscow: Standartinform; 2014. 16 p. (In Russ.).
13. Mayorov A. V., Svetlov A. V. Method for reducing temperature error of analog-to-digital converters of information-measuring systems based on “Systems on a crystal”. XXI century: results of the past and problems of the present. 2015;1(3):149–154. (In Russ.).
14. Panasiti M. D., Lemmon E. W., Penoncello S. G., Jacobsen R. T., Friend D. G. Thermodynamic properties of air from 60 to 2000 K at pressures up to 2000 MPa. International journal of thermophysics. 1999;20:217–228.
15. Gargaud M., Amils R., Cernicharo J. et al. Encyclopedia of astrobiology. Berlin; Heidelberg: Springer; 2011. 1853 p. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_643.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бобрышов Алексей Павлович, ассистент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, цифровые технологии, робототехника, электроснабжение энергетических систем, электрические контрольно-измерительные приборы, поверка, статистика, электроника, качество продукции, организация автоматизированной поверки.

Солёный Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, цифровые технологии, робототехника, электроснабжение энергетических систем, информационная безопасность, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект.

Кузьменко Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электротехника, светодиодное освещение, энергообеспечение, качество электрической энергии, цифровая энергетика, цифровая релейная защита, преобразовательная электроника.

Bobryshov Aleksey P., Assistant at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power industry, electromechanics, automation, digital technologies, robotics, power supply of energy systems, electrical control and measuring devices, verification, statistics, electronics, product quality, organization of automated verification.

Solyonyj Sergey V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power engineering, electromechanics, automation, digital technologies, robotics, power supply of power systems, information security, technological entrepreneurship, artificial intelligence.

Kuzmenko Vladimir P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power engineering, electrical engineering, LED lighting, power supply, quality of electric energy, digital power engineering, digital relay protection, converter electronics.

Лач Сергей Юрьевич, ассистент кафедры электро-механики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, цифровые технологии, робототехника, диагностика электромеханических систем, киберфизические системы, релейная защита.

Демченко Геннадий Владимирович, доцент кафедры электромеханики и теоретических основ электротехники Донецкого национального технического университета.

Область научных интересов – электрические машины, электротехника, электроэнергетика, теоретические основы электротехники автоматизация.

Поступила в редакцию 04.12.2024

Поступила после рецензирования 09.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Lach Sergey Yu., Assistant at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power engineering, electromechanics, automation, digital technologies, robotics, diagnostics of electromechanical systems, cyberphysical systems, relay protection.

Demchenko Gennady V., Associate Professor at the Department of Electromechanics and Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Donetsk National Technical University.

Research interests – electric machines, electrical engineering, electric power engineering, and the theoretical foundations of electrical engineering automation.

Received 04.12.2024

Revised 09.12.2024

Accepted 21.01.2025

Научная статья
УДК 006.91:536.5.081

DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-16-21

Оценка факторов, влияющих на качество производства ампул реперных точек

Алексей Дмитриевич Катышев^{1,2}

✉ a.d.katyshev@vniim.ru, orcid.org/0009-0006-0542-3805, SPIN-код: 9977-8609

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В области контактной термометрии используются ампулы реперных точек для создания высокостабильной температурной среды. Самым дорогим компонентом при изготовлении ампул является высокочистый металл (5N). Описан технологический процесс производства ампул реперных точек. Применен инструмент качества «диаграмма Исикавы» для определения причинно-следственных связей между факторами и метрологическими характеристиками ампулы. Построен ориентированный граф, отражающий вероятностную модель влияния факторов на качество изготовления ампулы. Рассмотрены методы оценки влияния примесей металла, рекомендуемые Консультативным комитетом по термометрии. Предложено использование масс-спектрометра для оценки чистоты металла в качестве процедуры входного контроля при закупке металла, позволяющее обеспечивать качество производства ампул чистых веществ.

Ключевые слова: Международная температурная шкала, диаграмма Исикавы, контактная термометрия, ампула реперной точки, чистота металла

Для цитирования: Катышев А. Д. Оценка факторов, влияющих на качество производства ампул реперных точек // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 16–21. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-16-21.

Original article

Evaluation of factors influencing production of fixed point cell's production quality

Aleksey D. Katyshev^{1,2}

✉ a.d.katyshev@vniim.ru, orcid.org/0009-0006-0542-3805, SPIN-code: 9977-8609

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

² Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Fixed-point cells are used to create a highly stable temperature environment in the field of contact thermometry. The high-purity metal (5N) is the most expensive component which necessary to purchase for production fixed-point cells. The technological process for producing fixed-point cells are described. The quality tool Ishikawa diagram 6M was used to determine the cause-and-effect relationships between influencing factors and the quality of fixed-point cells. An oriented graph is constructed reflecting a probabilistic model of the influence of factors on the manufacturing quality of the cell. The methods of assessing metallic impurities recommended by the CCT are considered. It is proposed to use a mass spectrometer to assess metal purity as an incoming control procedure when purchasing metal, which allows ensuring the quality of production of fixed-point cells.

Keywords: ITS-90, Ishikawa diagram, contact thermometry, fixed point cell, metal purity

For citation: Katyshev A. D. Evaluation of factors influencing production of fixed point cell's production quality. Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation. 2025;4(1):16–21. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-16-21.

Введение

В соответствии с новым определением единицы температуры, Кельвин (К) определяется путем установления фиксированного значения постоянной Больцмана, однако Международная температурная шкала (далее – МТШ-90) не утратила свою силу в области контактной термометрии [1]. МТШ-90 основа на реперных точках, в качестве которых на практике используются

ампулы чистых веществ. Ампулы реперных точек широко применяются для обеспечения единства измерений температуры на всех уровнях государственной поверочной схемы для поверки и калибровки ампул и термометров [2]. Качество изготовления ампулы зависит от многих факторов. Использование инструмента качества «диаграмма Исикавы» позволяет выстроить причинно-следственные связи для процесса технологического производства ампул [3]. Диаграмма

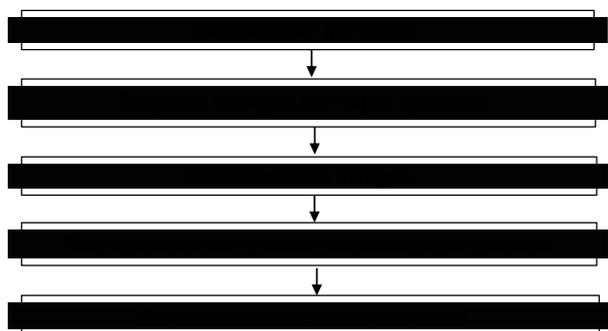
Исикавы представляет собой графическое изображение связи между результатом и факторами, способными оказать влияние на результат. Для управления качеством продукции необходимо определить рычаги управления процессом производства и контроля, что приведет к обеспечению качества выпускаемой продукции.

Целью исследования является определение факторов, влияющих на качество изготовления ампул чистых веществ в области контактной термометрии для определения процедур входного контроля.

Метрологический контроль производства ампул

Типовой технологический процесс производства ампул показан на рис. 1.

Процесс производства ампул начинается с подписания договора, после чего закупаются материалы, необходимые для изготовления ампулы, – металл, кварцевые трубки, детали для графитового тигля. Самым дорогим компонентом является металл, так как, согласно ГОСТ 8.814-



• *Рис. 1. Технологический процесс производства ампул реперных точек*

• *Fig. 1. Technological process for the production of fixed points cell*

- *Метрологические характеристики для ампул реперных точек металлов, мК*
- *Metrological characteristics for fixed point cell, mK*

Реперная точка	Допустимое значение СКО суммарной погрешности		Значение допустимой поправки	
	для ампул 0-го разряда	для ампул 1-го разряда	для ампул 0-го разряда	для ампул 1-го разряда
Ga	0,2	0,6	(±1,0)	(±1,0)
In	0,5	2,0	(±3,0)	(±2,0)
Sn	1,0	2,0	(±5,0)	(±10,0)
Zn	2,0	5,0	(±10,0)	(±20,0)
Al	5,0	10,0	(±20,0)	(±50,0)
Ag	10,0	30,0	(±50,0)	(±100,0)

2013 и документам Консультативного комитета по термометрии, чистота металла должна быть не менее 5N. Чистота металла в ампуле является фактором, влияющим на регистрируемую температуру фазового перехода. При использовании металла менее 5N значение среднеквадратического отклонения (СКО) суммарной погрешности воспроизведения температуры реперной точки может превышать допустимое значение.

В процессе изготовления металл высокой чистоты заправляется в графитовый тигель. Внутри тигля находится канал для погружения эталонного термометра сопротивления (ЭТС). Графитовый тигель помещается в оболочку из кварцевого стекла. Ампула заполняется инертным газом, таким образом, что давление внутри ампулы равняется 1 атм при температуре фазового перехода металла. Также аргон предотвращает окисление заправленного металла. Процесс изготовления ампул требует высокой квалификации специалиста.

После изготовления ампулы необходимо определить ее метрологические характеристики (значения суммарной погрешности (стандартной неопределенности) воспроизведения температуры). Метрологические характеристики для ампул реперных точек металлов приведены в таблице.

По результатам определения метрологических характеристик оформляется сертификат калибровки. Затем ампулу подготавливают к отправке. Такие ампулы серийно производятся в лаборатории эталонов и научных исследований в области термометрии Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева (Санкт-Петербург). Обеспечение качества серийного производства такого продукта позволит повысить результативность деятельности лаборатории.

Объектом диаграммы Исикавы, для которого определяются факторы, выступает качество ампул, а именно – метрологическая характеристика

ампулы, которая определяется после изготовления. Диаграмма Исикавы (рис. 2) построена по принципу «6М»: «Man» (человек), «Machine» (оборудование), «Method» (метод), «Materials» (материалы), «Measurements» (измерения), «Mother nature» (окружающая среда) [4].

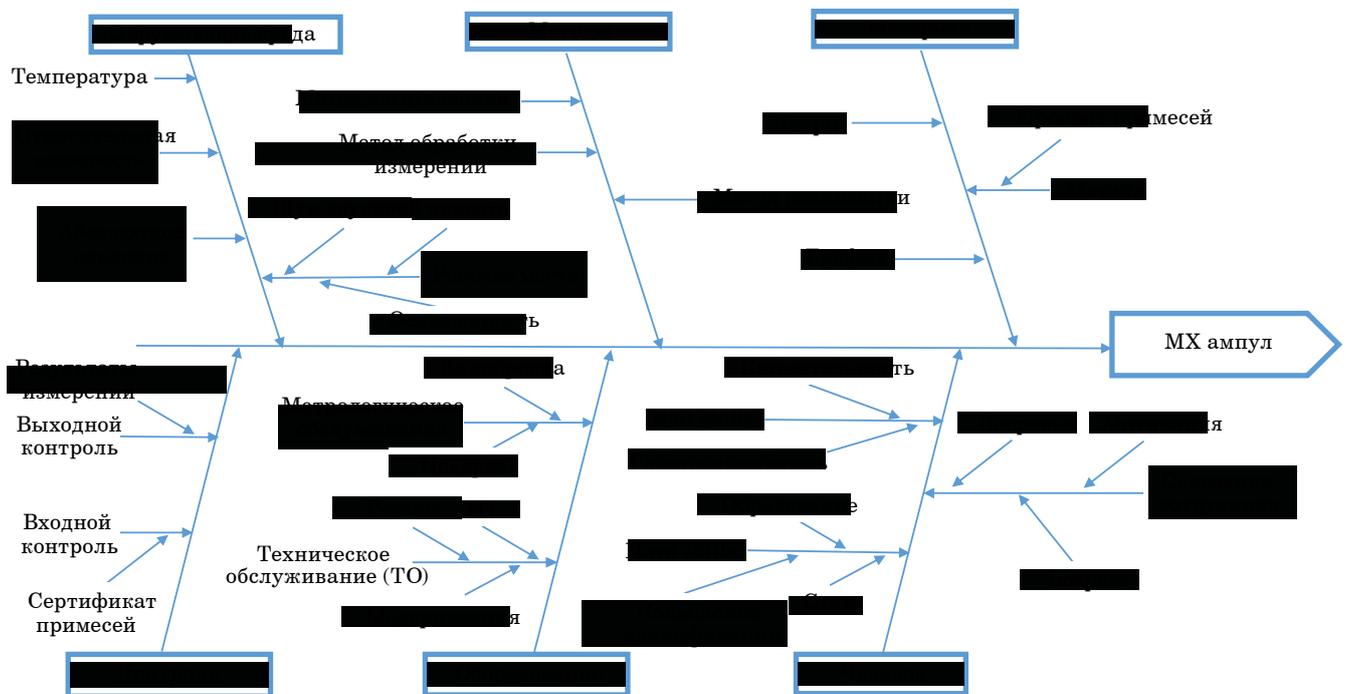
По диаграмме причинно-следственных связей определены факторы, которые оказывают большее влияние на качество ампул: процент примесей в металле, метод изготовления ампулы, метод реализации температуры фазового перехода, обработка результатов измерений, профессиональные навыки и процедуры входного контроля. На рис. 3 показан ориентированный взвешенный граф, построенный по матрице смежности, который отражает вероятностную модель изготовления ампулы:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 90 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 10 & 80 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 30 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

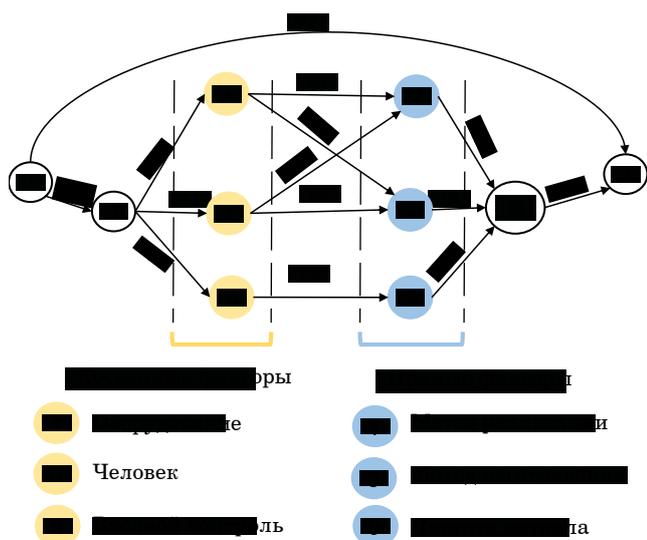
Матрица смежности ориентированного взвешенного графа представляет собой цепь Маркова. В данном случае эта матрица называется также матрицей переходных вероятностей.

Выделенные цветом вершины графа являются факторами, из-за которых ампула может быть признана непригодной; ребра графа отражают прямое или косвенное влияние фактора на итоговый результат. Каждому ребру графа присвоен вес, который отражает вероятность того или иного события или фактора при производстве ампул. Согласно графу на рис. 3, построенному на основе статистических данных и экспертного мнения, самым вероятностным фактором при изготовлении непригодной ампулы является входной контроль закупаемого высокочистого металла.

Итак, примеси в металле являются составляющей, которая вносит наибольший вклад в неопределенность измерения температуры [5–7]. Консультативный комитет по термометрии «Руководства по реализации МТШ-90» рекомендует в разделе 2.1 «Реперные точки: влияние примесей» два метода оценки влияния примесей. Один из них – «The sum of individual estimates (SIE)», который основан на суммировании индивидуальных оценок всех примесей. Метод «The overall maximum estimate (OME)» также является методом для оценки влияния примесей в металле, однако он менее информативный. Все, что требуется для применения метода, – это оценка общей



• Рис. 2. Диаграмма Исикавы факторов, влияющих на метрологические характеристики (MX) ампулы
 • Fig. 2. Ishikawa diagram of influencing factors on the metrological characteristics of the fixed point cell

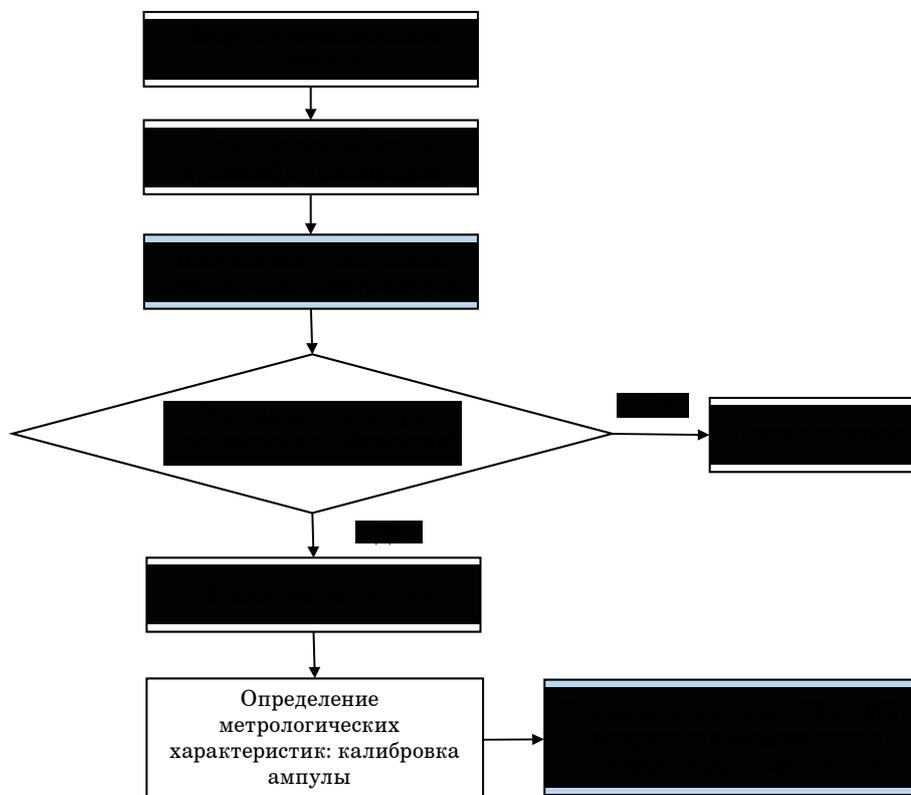


• Рис. 3. Вероятностная модель событий, влияющих на качество ампулы
 • Fig. 3. Probabilistic model of events affecting the quality of the fixed point cell

концентрация примесей, выраженная в мольных долях, т. е. для применения необходимо знать процент общего содержания примесей в металле. Методы SIE и OME могут использоваться для научных исследований первичного эталона

температуры в области контактной термометрии и при международных сличениях, однако при серийном производстве ампул необходимо рассмотреть иной способ, позволяющий уменьшить вероятность изготовления непригодной ампулы из-за влияния примесей. Единственная процедура входного контроля на данный момент – наличие сертификата примесей на закупаемый через аукцион металл.

Для обеспечения качества серийного производства ампул необходимо рассмотреть использование спектрометра для оценки чистоты металла как процедуру входного контроля. Метод масс-спектрометрии с тлеющим разрядом (GDMS) [8] находит широкое применение в анализе металлов и сплавов. Полученные данные анализа примесей по результатам процедуры входного контроля следует сравнить с данными, заявленными в сертификате поставщика. При обнаружении примесей, превышающих значения, заявленные в сертификате поставщика, заказчик имеет право отправить претензионное письмо поставщику металла и отказаться от приемки материала. Использование масс-спектрометра и применение методов оценки влияния примесей SIE и OME показано в алгоритме производства ампулы на рис. 4.



• Рис. 4. Алгоритм производства ампул реперных точек
 • Fig. 4. Algorithm for the production of fixed point cell

Использование масс-спектрометра на этапе входного контроля обеспечит надежность использования металла для производства ампул с чистотой не менее 99,999 %. Применение метода SIE позволит уменьшить неопределенность измерений температуры за счет определения поправки температуры фазового перехода металла в ампуле.

Заключение

Фактор «примеси в металле» является основной причиной изготовления забракованной ампулы согласно диаграмме Исикавы и матри-

це переходных вероятностей. Внедрение процедуры входного контроля при закупке металла позволяет уменьшить составляющую неопределенности из-за наличия примесей, что обеспечит качество серийного производства ампул в лаборатории термометрии. Исследование полезно для организаций, изготавливающих ампулы чистых веществ. Дальнейшим планом исследования является сравнение данных в сертификате примесей от поставщика с полученными данными по примесям с помощью масс-спектрометра, составление и оценка расширенного бюджета неопределенности измерений температуры для ампулы индия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Duan Y. Report by the President of the CCT // Proceedings of the 25th meeting of the General conference on weights and measures. 2014. P. 353. URL: <https://www.bipm.org/documents/20126/17314988/CGPM25.pdf/64861bb0-b7ea-531d-3f24-b108002471c4> (дата обращения: 24.11.2024).
2. Государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне 0–3200 °С ГЭТ 34-2020: практическая реализация нового определения кельвина / А. И. Походун [и др.] // Измерительная техника. 2021. № 7. С. 13–21. Doi: 10.32446/0368-1025it.2021-7-13-21.
3. Use of the Ishikawa diagram in the investigation of some industrial processes / C. Botezatu [et al.] // IOP conf. ser. mater. sci. eng. 2019. № 682. P. 012012. Doi: 10.1088/1757-899X/682/1/012012.
4. Luca L. A new model of Ishikawa diagram for quality assessment // IOP conf. ser. mater. sci. eng. 2016. № 161. P. 012099. Doi: 10.1088/1757-899X/161/1/012099.
5. Fahr M., Rudtsch S. Oxides in metal fixed points of the ITS-90 // Metrologia. 2009. Vol. 46, № 5. P. 423. Doi: 10.1088/0026-1394/46/5/006.
6. Fellmuth B., Fischer J., Tegeler E. Uncertainty budgets for characteristics of SPRTs calibrated according to the ITS-90: working document CCT/01-02. 2001.
7. Hill K. D., Rudtsch S. Thermometry's dependence on chemical metrology: a needs-based assessment // Metrologia. 2005. № 42. P. L1–L4.
8. Алексеев А. В., Якимович П. В., Кошелев А. В. Анализ алюминия методом масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом // Труды ВИАМ. 2023. № 5. С. 12. Doi: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-134-144.

REFERENCES

1. Duan Y. Report by the President of the CCT. Proceedings of the 25th meeting of the General conference on weights and measures. 2014, pp. 353. Available from: <https://www.bipm.org/documents/20126/17314988/CGPM25.pdf/64861bb0-b7ea-531d-3f24-b108002471c4> [Accessed 24.11.2024].
2. Pokhodun A. I., Fuksov V. M., Sild Yu. A. et al. State primary standard of temperature unit in the range 0–3200 °C GET 34-2020: practical implementation of the new definition of kelvin. Measuring technology. 2021;(7):13–21. (In Russ.). Doi: 10.32446/0368-1025it.2021-7-13-21.
3. Botezatu C., Condrea I., Oroian B., Hrițuc A., Ețcu M., Slătineanu L. Use of the Ishikawa diagram in the investigation of some industrial processes. IOP conf. ser. mater. sci. eng. 2019;(682):012012. Doi: 10.1088/1757-899X/682/1/012012.
4. Luca L. A new model of Ishikawa diagram for quality assessment. IOP conf. ser. mater. sci. eng. 2016;(161):012099. Doi: 10.1088/1757-899X/161/1/012099.
5. Fahr M., Rudtsch S. Oxides in metal fixed points of the ITS-90. Metrologia. 2009;46(5):423. Doi: 10.1088/0026-1394/46/5/006.
6. Fellmuth B., Fischer J., Tegeler E. Uncertainty budgets for characteristics of SPRTs calibrated according to the ITS-90: working document CCT/01-02. 2001.

7. Hill K. D., Rudtsch S. Thermometry's dependence on chemical metrology: a needs-based assessment. *Metrologia*. 2005;(42):L1–L4.
8. Alekseev A. V., Yakimovich P. V., Koshelev A. V. Analysis of aluminum by high-resolution glow discharge mass spectrometry. *Trudy VIAM*. 2023;(5):12. (In Russ.). Doi: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-134-144.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Катышев Алексей Дмитриевич, студент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения; инженер научно-исследовательской лаборатории эталонов и научных исследований в области термометрии Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева.

Область научных интересов – контактная и радиационная термометрия.

Поступила в редакцию 16.12.2024

Поступила после рецензирования 19.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Katyshev Aleksey D., Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; Engineer at the Research Laboratory of Standards and Scientific Research in the Field of Thermometry, Mendeleyev Institute for Metrology.

Research interests – contact and radiation thermometry.

Received 16.12.2024

Revised 19.12.2024

Accepted 21.01.2025

Научная статья
УДК 65.011.56

DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-22-28

Проектирование интегрированной автоматизированной системы управления

Александра Валерьевна Винниченко¹

✉ alex23rain@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3317-4723

Елизавета Дмитриевна Красовская¹

lkirza02@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Описана модель проектирования интегрированной автоматизированной системы управления (ИАСУ). Рассматриваются различные подходы к проектированию ИАСУ, анализируются преимущества и недостатки, предлагается авторская модель ИАСУ, базирующаяся на трех автоматизированных системах управления системы планирования ресурсов предприятия (ERP), системы управления цепочками поставок (SCM) и системы управления производством (MES).

Ключевые слова: интеграция, автоматизированная система управления, ERP-система, SCM-система, MES-система

Для цитирования: Винниченко А. В., Красовская Е. Д. Проектирование интегрированной автоматизированной системы управления // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 22–28. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-22-28.

Original article

Designing an integrated automated control system

Alexandra V. Vinnichenko¹

✉ alex23rain@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3317-4723

Elizabeth D. Krasovskaya¹

lkirza02@gmail.com

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

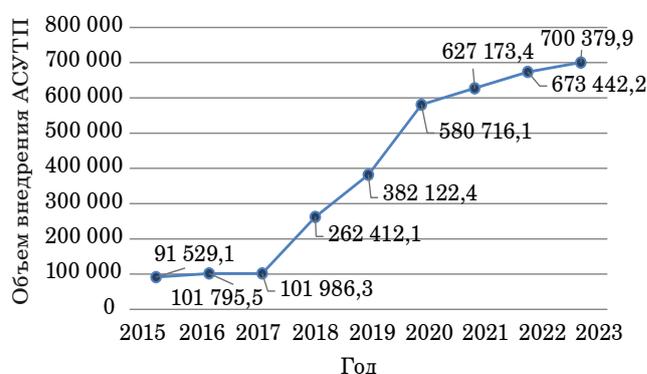
Abstract. The article describes a design model for an integrated automated control system (IASU). Various approaches to IASU design are considered, the advantages and disadvantages are analyzed, and the author's IAS model is proposed, based on three automated control systems (ACS) of the enterprise resource planning system (ERP), supply chain management system (SCM) and production management system (MES).

Keywords: integration, automated management system, ERP system, SCM system, MES system

For citation: Vinnichenko A. V., Krasovskaya E. D. Designing an integrated automated control system. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):22–28. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-22-28.

В различных трудах были исследованы и проанализированы возможности применения автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП) в промышленном секторе отечественного рынка. В качестве примеров таких работ можно назвать статью А. Г. Кононенко, М. Г. Павленко и Е. А. Долишняка [1], работу И. Ю. Анциферова [2], а также отчет *DISCOVERY Research Group* [3] и маркетинговое исследование компании *Reaskills* [4].

По данным из приведенных статей, на сегодняшний день российский рынок АСУТП имеет положительный темп роста [5] (рис. 1). Это показывает, что предприятия активно переходят на автоматизированные системы управления (АСУ). Современная политико-экономическая



• Рис. 1. Объем и динамика роста рынка АСУТП в России

• Fig. 1. The volume and dynamics of the automated control system market growth in Russia

ситуация формирует приоритетный тренд на развитие отечественных решений АСУ, что также подтверждается государственными программами [6] и государственной поддержкой [7, 8], формируя устойчивость промышленного сектора и его готовность адаптироваться к новым условиям.

Рынок АСУТП сталкивается с рядом препятствий, замедляющих его развитие. Уход иностранных компаний выявил уязвимости в оборудовании и программном обеспечении, что акту-

ализировало необходимость импортозамещения. Кроме того, значительное количество предприятий продолжает использовать устаревшие системы, а недостаточный уровень информационной безопасности и ограниченное развитие электронной промышленности создают дополнительные риски. Дефицит квалифицированных специалистов также затрудняет внедрение и поддержку передовых технологий.

Трудности, связанные с внедрением АСУ на предприятиях, формируют необходимость в раз-

- *Преимущества и недостатки АСУТП*
- *Advantages and disadvantages of automated control systems*

АСУТП	Преимущества	Описание	Недостатки	Описание
ERP [9]	Автоматизация бизнес-процессов	Переход на электронный документооборот и автоматизация рутинных задач	Высокая стоимость	Сложность разработки, внедрение и обучение персонала
	Единая база данных	Доступ к оперативной информации для совместной работы	Продолжительное внедрение	От одного до трех лет для крупных организаций
	Универсальность	Решения для любых отраслей и типов производства	Сложность освоения	Сложные интерфейсы, длительное обучение
	Комплексное решение	Управление всеми процессами в одном программном комплексе	Дополнительные косвенные затраты	Обновление оборудования, программных средств, каналов связи
SCM [10]	Комплексный подход	Полное управление цепочкой поставок, включая планирование, исполнение и контроль	Сложность внедрения	Установка и настройка системы требуют ресурсов и времени
	Глубокая аналитика	Сложный анализ и отчеты для стратегических решений	Ограниченная адаптивность	Изменения в процессах могут требовать ручного вмешательства
	Эффективность	Оптимизация процессов и управление запасами для снижения затрат и улучшения качества обслуживания	–	–
CRM [11]	Увеличение времени на клиентский сервис	У менеджеров остается больше времени на работу с клиентами	Затраты на приобретение, внедрение, обслуживание и хранение данных	Понадобится оплата услуг специалистов
	Повышение квалификации персонала	Сотрудники могут оперировать цифрами и актуальной информацией о продуктах	Обучение персонала	Потребуется тренеры и дополнительные финансовые и временные затраты
	Улучшение имиджа	Внедрение новых технологий положительно влияет на восприятие бренда, увеличивает лояльность клиентов	Техническая поддержка	Необходим круглосуточный контакт с поставщиком услуг или собственный сотрудник для обеспечения этой функции
	–	–	Чрезмерная роботизация	В отношениях с клиентами нужно сохранять живое общение
	–	–	Сопrotивление внедрению	Персонал может недоверчиво относиться к автоматическим сервисам

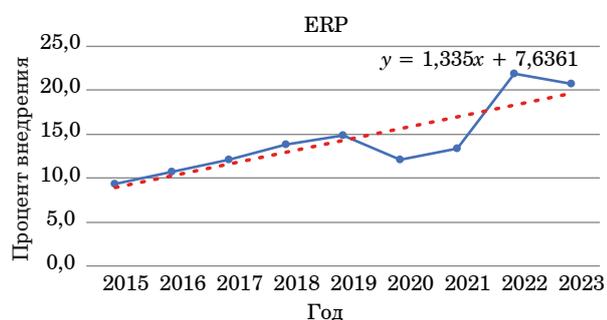
работке универсального отечественного инструмента автоматизации, который будет иметь единую систему и позволит эффективно работать с различными компонентами среды предприятия. Интегрированные АСУТП, разработанные на основе независимых технологий, могут удовлетворить эту потребность, обеспечив надежность и устойчивость к внешним ограничениям.

Одним из технических решений рассматривается интеграция ERP-, SCM- и CRM-систем, которая позволит оптимизировать производственные и процессы на отечественных предприятиях.

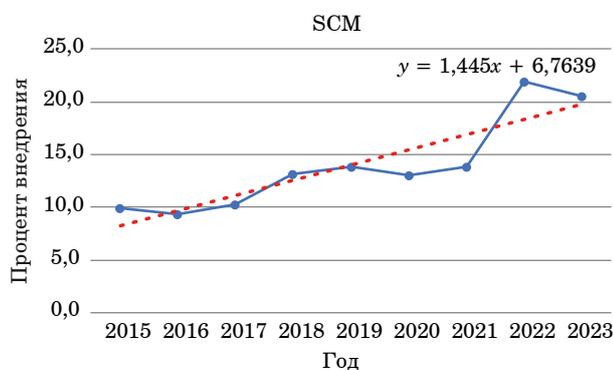
Для построения интегрированной АСУ стоит учесть преимущества и недостатки для каждой из существующих систем (таблица).

Рассмотренные преимущества и недостатки различных видов АСУТП напрямую влияют на их востребованность в промышленности, что просматривается в статистике их внедрения за период с 2015 по 2023 г. [12, 13], которая демонстрирует, какие системы используются чаще всего и почему (рис. 2–4).

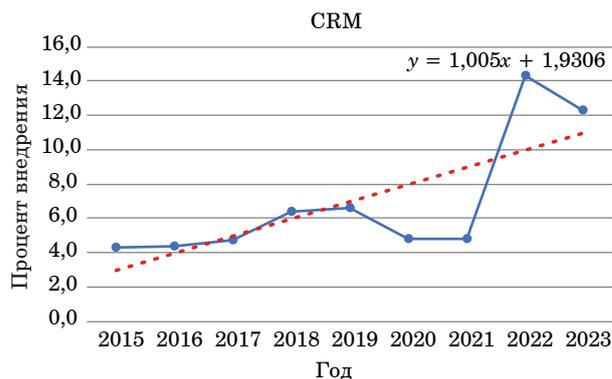
На предприятиях часто используются несколько типов АСУТП, однако, как показывает статистика, они не взаимосвязаны. Несмотря на положительный коэффициент изменения про-



• Рис. 2. Процент внедрения ERP-системы в России
 • Fig. 2. Percentage of ERP system implementation in Russia



• Рис. 3. Процент внедрения SCM-систем в России
 • Fig. 3. Percentage of SCM systems implementation in Russia



• Рис. 4. Процент внедрения CRM-систем в России
 • Fig. 4. Percentage of CRM systems implementation in Russia

цента внедрения, каждая система развивается независимо, что связано с особенностями ее использования, сложностью и областью применения. Например, в то время как SCM-система остается наименее востребованной, ERP- и CRM-системы активно внедряются на предприятиях и имеют схожие темпы роста. Отсутствие интеграции между АСУТП в среде одной организации ограничивает их потенциал для комплексного управления и оптимизации процессов на предприятиях.

Для разработки структурной блок-модели проектирования интегрированной автоматизированной системы необходимо проанализировать алгоритмы работы автоматизированных систем управления, выбранных для интеграции (рис. 5–7).

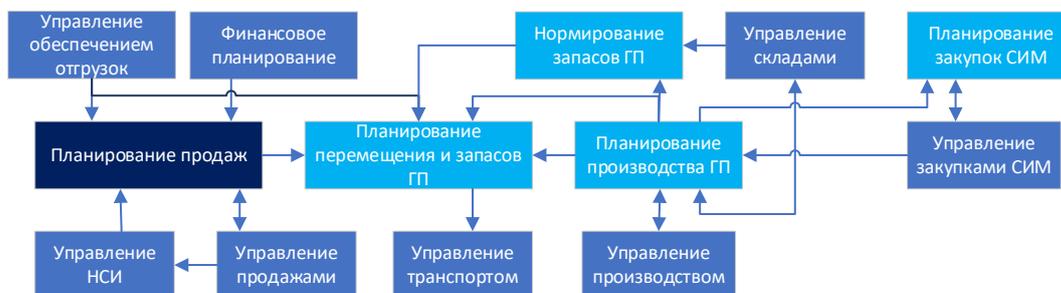
ERP-системы обычно используют модульную архитектуру, где каждый модуль отвечает за определенную функциональную область, такую как финансы, производство, управление цепочками поставок и управление персоналом. Алгоритмы ERP-систем оптимизированы для обработки больших объемов транзакционных данных и обеспечения согласованности данных во всей организации.

SCM-системы используют алгоритмы для оптимизации процессов управления цепочками поставок, включая планирование спроса, управление запасами, управление поставщиками и логистику. Эти алгоритмы помогают предприятиям повысить эффективность цепочки поставок, снизить затраты и улучшить обслуживание клиентов.

CRM-системы используют алгоритмы для управления взаимодействием с клиентами, включая управление продажами, маркетингом и обслуживанием клиентов. Эти алгоритмы помогают предприятиям отслеживать поведение клиентов, персонализировать маркетинговые кампании и улучшать качество обслуживания клиентов.



• *Рис. 5. Алгоритм работы ERP-системы [14]*
 • *Fig. 5. The algorithm of the ERP system [14]*



• *Рис. 6. Алгоритм работы SCM-системы [15]: ГП – готовая продукция; НСИ – нормативно-справочная информация; СИМ – система интегрированных материалов*
 • *Fig. 6. The algorithm of the SCM system [15]: ГП – finished products; НСИ – regulatory and reference information; СИМ – integrated materials system*



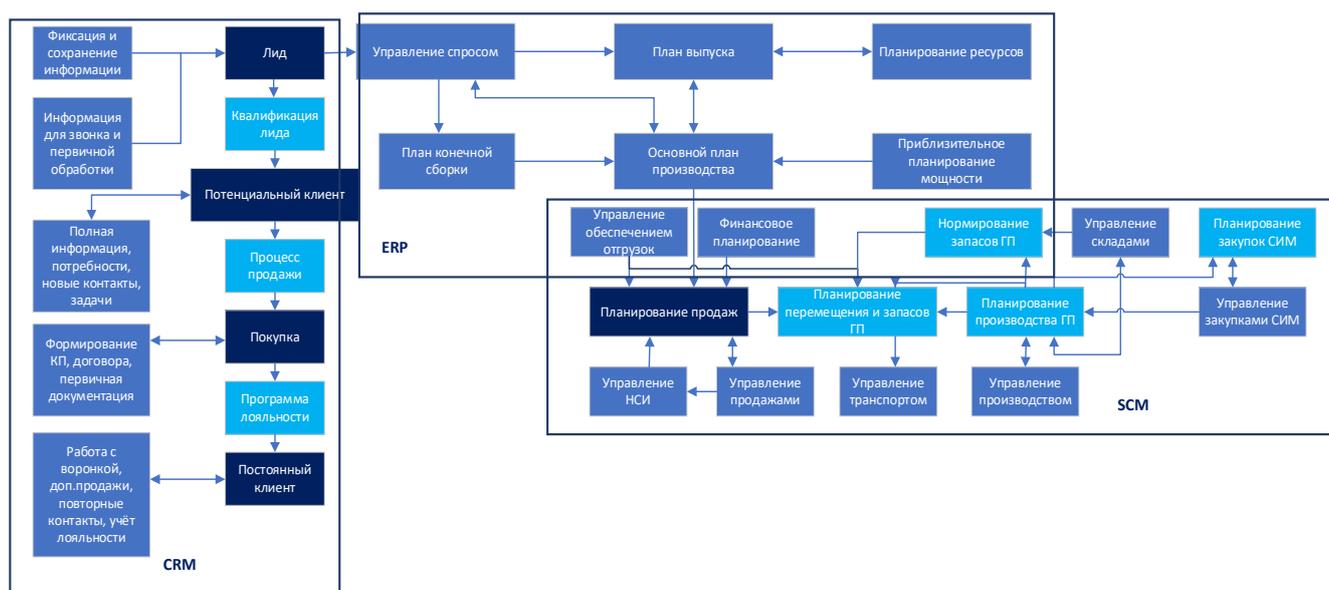
• *Рис. 7. Алгоритм работы CRM-систем [16]*
 • *Fig. 7. The algorithm of CRM systems [16]*

На основе исследованных алгоритмов работ АСУ были определены точки интеграции и разработана модель для проектирования ИАСУТП, которая позволяет создавать эффективные и надежные системы, отвечающие требованиям конкретного предприятия (рис. 8).

Интеграция достигается путем синергии разнонаправленных АСУТП и реализуется с помощью проектирования, под которым понимается процесс разработки технических решений, пред-

назначенных для автоматизации управления производственными и технологическими процессами организации, позволяя создавать эффективные и надежные системы, отвечающие требованиям предприятия рыночного спроса.

Проектирование и внедрение ИАСУ являются важными шагами в цифровизации промышленности, позволяя автоматизировать производственные процессы, повышать эффективность и конкурентоспособность предприятий. Разработанный



• *Рис. 8. Алгоритм работы интегрированной АСУТП*
 • *Fig. 8. The algorithm of the integrated automated control system*

алгоритм позволит нивелировать проблемы, связанные с взаимодействием разных структурных подразделений в организации, повысить эффективность и производительность, а также при внедрении через локальную сеть обеспечит более высокую степень информационной безопасности.

Разработанная модель проектирования ИАСУ может быть использована для создания эффективных и надежных автоматизированных систем управления, отвечающих современным требованиям к цифровым технологиям для предприятий промышленного сектора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кононенко А. Г., Павленко М. Г., Долишняк Е. А. Перспективы развития АСУ ТП в России // Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики: сб. тез. II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Алчевск, 25–26 апр. 2024 г.). / ФГБОУ ВО «ДонГТУ». 2024. С. 129–131.
2. Анциферов И. Ю. Автоматизированные системы управления в России в 2023 году: проблемы и тенденции // Молодой ученый. 2024. № 3 (502). С. 1–4.
3. Анализ рынка АСУ ТП в России. URL: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Demo_Otchet_Analiz_rynka_ASU_TP_v_Rossii.pdf (дата обращения: 19.11.2024)
4. Анализ рынка автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), 2014–2018 гг. URL: [https://reaskills.ru/media/competences/document/Цифровое%20ПСР%20предприятия%20\(Lean%20Smart%20Plant\)/Atomskills%202022/Маркетинговое_иссле.pdf](https://reaskills.ru/media/competences/document/Цифровое%20ПСР%20предприятия%20(Lean%20Smart%20Plant)/Atomskills%202022/Маркетинговое_иссле.pdf) (дата обращения: 19.11.2024).
5. НКК – об импортозамещении в автоматизации промышленности – РБК отрасль. URL: <https://www.rbc.ru/industries/news/66ed21cf9a79478dc2de7178> (дата обращения: 19.11.2024).
6. Ведомственный проект «Цифровая промышленность». URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/vedomstvennyij-proekt-tsifrovaya-promyishlennost.pdf> (дата обращения: 08.12.2024).
7. Субсидии российским организациям на финансовое обеспечение части затрат на реализацию проектов по внедрению российских решений в сфере информационных технологий в целях повышения уровня «цифровой зрелости» отраслей промышленности. URL: <https://gisp.gov.ru/nmp/measure/12448541> (дата обращения: 08.12.2024).
8. Минпромторг разработал нацпроект, чтобы помочь РФ попасть в топ-25 стран по роботизации. ComNews. URL: <https://www.comnews.ru/content/235044/2024-09-05/2024-w36/1007/minpromtorg-razrabotal-nacproekt-chtoby-pomoch-rf-popast-top-25-stran-robotizacii> (дата обращения: 08.12.2024).
9. ERP-системы: преимущества и недостатки. URL: <https://adeptik.com/blog/preimushchestva-i-nedostatki-erp-sistemy/> (дата обращения: 25.11.2024).

10. AI-боты против систем управления цепочками поставок (SCM): как технологии помогают в логистике?. URL: <https://neiroseti.ai/tpost/xyxklnfok1-ai-boti-protiv-sistem-upravleniya-tsepoc> (дата обращения: 25.11.2024).
11. Преимущества CRM-систем: плюсы использования и недостатки. URL: <https://aspro.cloud/crm/docs/crm-advantages/> (дата обращения: 25.11.2024).
12. Информационное общество в Российской Федерации. 2020: статист. сб. / Федеральная служба государственной статистики; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2020.
13. Мониторинг развития информационного общества в Российской Федерации. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/monitor.xlsx> (дата обращения: 05.12.2024).
14. Функции ERP-систем. Shtampik.com. URL: <https://shtampik.com/photo/funksii-erp-sistem/> (дата обращения: 25.11.2024).
15. Что такое SCM: управление цепочками поставок, методы управления цепями поставок. Goodsforecast. URL: <https://www.goodsforecast.ru/blog/integrirovannoe-planirovanie/chto-takoe-scm-upravlenie-tsepochkami-postavok/> (дата обращения: 25.11.2024).
16. CRM: продажи на реактивной тяге. Habr. URL: <https://habr.com/ru/amp/publications/314130/> (дата обращения: 25.11.2024).

REFERENCES

1. Kononenko A. G., Pavlenko M. G., Dolishnyak E. A. Prospects for the development of automated process control systems in Russia. Innovations and information technologies in the context of the digitalization of the economy: collection of theses. II International scientific and practical conference (Alchevsk, 25–26 April 2024); FSBEI HE DonGTU; 2024, pp. 129–131. (In Russ.).
2. Antsiferov I. Y. Automated control systems in Russia in 2023: problems and trends. Young scientist. 2024;3(502):1–4. (In Russ.).
3. Analysis of the automated process control system market in Russia. Available from: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Demo._Otchet._Analiz_rynka_ASU_TP_v_Rossii.pdf [Accessed 19 November 2024].
4. Market analysis of automated process control systems (ACS), 2014–2018. Available from: [https://reaskills.ru/media/competences/document/Цифровое%20ПЦР%20предприятия%20\(Lean%20Smart%20Plant\)/Atomskills%202022/Маркетинговое_иссле.pdf](https://reaskills.ru/media/competences/document/Цифровое%20ПЦР%20предприятия%20(Lean%20Smart%20Plant)/Atomskills%202022/Маркетинговое_иссле.pdf) [Accessed 19 November 2024].
5. NCC – on import substitution in industrial automation – RBC industries. Available from: <https://www.rbc.ru/industries/news/66ed21cf9a79478dc2de7178> [Accessed 19 November 2024].
6. Departmental project “Digital Industry”. Available from: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/vedomstvenny-ij-proekt-tsifrovaya-promyishlennost.pdf> [Accessed 8 December 2024].
7. Subsidies to Russian organizations for financial support of part of the costs of implementing projects to introduce Russian solutions in the field of information technology in order to increase the level of “Digital maturity” of industries. Available from: <https://gisp.gov.ru/nmp/measure/12448541> [Accessed 8 December 2024].
8. The Ministry of industry and trade has developed a national project to help the Russian Federation get into the top 25 countries in robotics. ComNews. Available from: <https://www.comnews.ru/content/235044/2024-09-05/2024-w36/1007/minpromtorg-razrabotal-nacproekt-chtoby-pomoch-rf-popast-top-25-stran-robotizacii> [Accessed 8 December 2024].
9. ERP systems: advantages and disadvantages. Available from: <https://adeptik.com/blog/preimushchestva-i-nedostatki-erp-sistemy> [Accessed 25 November 2024].
10. AI bots against Supply Chain Management (SCM) systems: how does technology help in logistics?. Available from: <https://neiroseti.ai/tpost/xyxklnfok1-ai-boti-protiv-sistem-upravleniya-tsepoc> [Accessed 25 November 2024].
11. Advantages of CRM systems: advantages of use and disadvantages. Available from: <https://aspro.cloud/crm/docs/crm-advantages> [Accessed 25 November 2024].
12. Information society in the Russian Federation. 2020: statistical collection; Federal State Statistics Service; National research. University of Higher School of Economics. Moscow: Higher School of Economics; 2020. (In Russ.).
13. Monitoring the development of the Information Society in the Russian Federation. Available from: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/monitor.xlsx> [Accessed 5 December 2024].
14. Functions of ERP systems. Shtampik.com. Available from: <https://shtampik.com/photo/funksii-erp-sistem> [Accessed 25 November 2024].
15. What is SCM: supply chain management, supply chain management methods. Goodsforecast. Available from: <https://www.goodsforecast.ru/blog/integrirovannoe-planirovanie/chto-takoe-scm-upravlenie-tsepochkami-postavok> [Accessed 25 November 2024].
16. CRM: jet sales. Habr. Available from: <https://habr.com/ru/amp/publications/314130> [Accessed 25 November 2024].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Винниченко Александра Валерьевна, старший преподаватель кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – автоматизированные системы для улучшения производственных систем.

Красовская Елизавета Дмитриевна, студентка кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – автоматизированные системы для улучшения производственных систем.

Поступила в редакцию 09.01.2025

Поступила после рецензирования 13.01.2025

Принята к публикации 21.01.2025

Vinnichenko Alexandra V., Senior Lecturer at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – automated systems for improving production systems.

Krasovskaya Elizabeth D., Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – automated systems for improving production systems.

Received 09.01.2025

Revised 13.01.2025

Accepted 21.01.2025

Исследование применения аддитивных технологий в атомной энергетике

Анастасия Дмитриевна Шабалина¹

✉ shabalina226@gmail.com

Александр Валерьевич Чабаненко¹

a@chabanenko.ru, orcid.org/0000-0002-5949-6579, SPIN-код: 7009-4753

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Аддитивные технологии в атомной энергетике представляют собой передовой метод, который революционизирует процесс производства и обслуживания компонентов ядерных реакторов. Эти технологии позволяют изготавливать детали с высокой точностью и сложной геометрией, минимизируя материалозатраты и время производства. Применение аддитивного производства сокращает сроки создания прототипов и изготовления уникальных компонентов, необходимых для модернизации и ремонта оборудования, что, в свою очередь, повышает надежность и безопасность ядерных объектов. Интеграция таких технологий способствует повышению эффективности энергетических систем, созданию новых типов реакторов и уменьшению экологической нагрузки. В целом развитие аддитивных технологий в атомной энергетике открывает новые горизонты для оптимизации производственных процессов и устойчивого развития энергетики.

Ключевые слова: аддитивные технологии, атомная энергетика, ядерные реакторы, модернизация оборудования

Для цитирования: Шабалина А. Д., Чабаненко А. В. Исследование применения аддитивных технологий в атомной энергетике // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 29–32. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-29-32.

Original article

Investigation of additive technologies application in nuclear power engineering

Anastasia D. Shabalina¹

✉ shabalina226@gmail.com

Aleksandr V. Chabanenko¹

a@chabanenko.ru, orcid.org/0000-0002-5949-6579, SPIN-code: 7009-4753

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Additive manufacturing in nuclear energy is a groundbreaking technique that is revolutionizing the way nuclear reactor components are fabricated and serviced. It enables the production of highly accurate and complex geometry parts, minimizing material waste and production time. The adoption of additive manufacturing reduces prototyping lead times and facilitates the fabrication of unique components required for equipment upgrades and repairs, thus enhancing the reliability and safety of nuclear facilities. This technology integration contributes to improved efficiency of energy systems, enabling the development of new reactor designs and reducing the environmental footprint. Overall, the advancement of additive manufacturing in nuclear energy holds the promise of optimizing manufacturing processes and driving sustainable energy development.

Keywords: additive manufacturing, atomic energy, nuclear reactors, equipment modernization

For citation: Shabalina A. D., Chabanenko A. V. Investigation of additive technologies application in nuclear power engineering. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):29–32. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-29-32.

Аддитивные технологии, также известные как 3D-печать, все больше привлекают внимание специалистов различных отраслей промышленности, включая атомную энергетику. В атомной отрасли эти технологии предоставляют возможность существенно улучшить процесс производства компонентов реакторов и сопутствующего оборудования. Благодаря своей способности создавать сложные детали с высокой степенью точности и

минимальными отходами, аддитивное производство открывает новые горизонты для оптимизации затрат и повышения эффективности производства. Традиционные методы изготовления часто включают в себя множество этапов обработки, которые могут быть длительными и затратными. Использование 3D-печати может сократить эти процессы, что приводит к сокращению времени производства и уменьшению себестоимости. Также

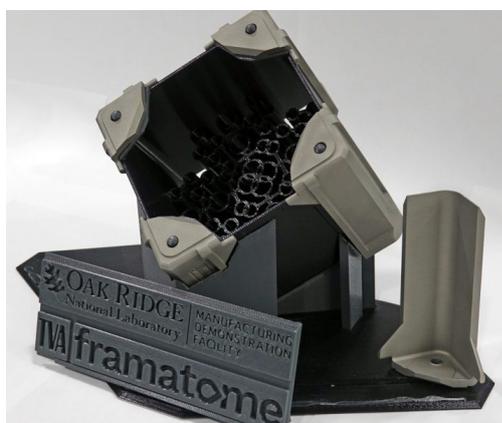
стоит отметить, что аддитивные технологии позволяют разрабатывать и тестировать прототипы новых компонентов с бóльшей скоростью, что, в свою очередь, ускоряет инновационный процесс в разработке ядерных реакторов и их вспомогательных систем [1]. Эта гибкость в проектировании и реализации может значительно улучшить адаптивность отрасли к условиям, подталкивающим к развитию более безопасных и эффективных энергетических решений. Применение аддитивных методов также способствует увеличению срока службы деталей благодаря возможности печати сложных внутренних структур, которые могут повысить производительность и безопасность реакторных компонентов.

Одной из актуальных технологий является аддитивное изготовление топливных сборок для ядерных реакторов (рис. 1). Эти элементы, конструкция которых может быть достаточно сложной, требуют высокого уровня точности и надежности. Аддитивные технологии позволяют выполнять сложные формы с высокой степенью точности и минимизировать отходы материалов [2].

В рамках анализа FMEA для аддитивных технологий в атомной энергетике показано, что основные риски включают в себя появление дефектов в структуре материала и отказ оборудования. Мы можем оценить вероятность возникновения каждого риска, серьезность последствий и способность его обнаружения, чтобы найти приоритетные показатели риска (RPN).

Дефекты структуры материала (все показатели по шкале от 1 до 10):

- вероятность (P) = 6;
 - серьезность (S) = 8;
 - обнаружение (D) = 3.
- $RPN = PSD = 144$.



• Рис. 1. Напечатанные на 3D-принтере уран-молибденовые и уран-кремниевые пластины для исследовательских реакторов

• Fig. 1. 3D-printed uranium-molybdenum and uranium-silicon plates for research reactors

Отказ оборудования (все показатели по шкале от 1 до 10):

- вероятность (P) = 4;
- серьезность (S) = 9;
- обнаружение (D) = 4.

$RPN = PSD = 144$.

При высоких значениях RPN необходимо разрабатывать меры по снижению вероятностей возникновения дефектов или улучшению их обнаружения, чтобы минимизировать потенциальные риски.

Для PEST-анализа учтем следующие факторы влияния на внедрение аддитивных технологий:

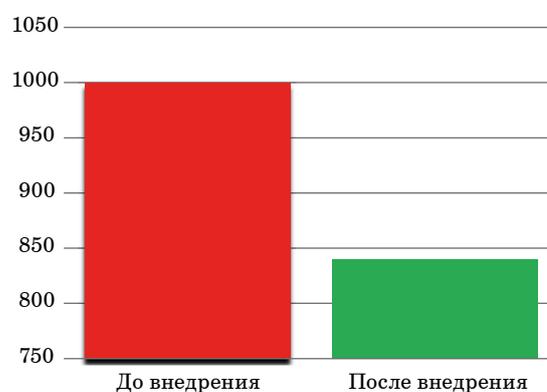
- политические факторы: например, наличие государственной поддержки для инноваций в области энергетики. Оценка: 7/10;
- экономические факторы: вариации в стоимости материалов и обработки. Оценка: 6/10;
- социальные факторы: готовность сотрудников к обучению новым технологиям. Оценка: 5/10;
- технологические факторы: уровень развития 3D-печати и сопутствующих технологий. Оценка: 8/10.

С помощью этих оценок мы можем сделать вывод, что технологический компонент является наиболее развитым фактором, что указывает на устоявшуюся базу для внедрения. Однако для успешного внедрения потребуется сосредоточение усилий на увеличении социальной приемлемости и поддержке.

Аддитивные технологии в атомной энергетике открывают новые горизонты благодаря своей способности быстро адаптироваться к изменениям требований рынка и развитию технологий [3].

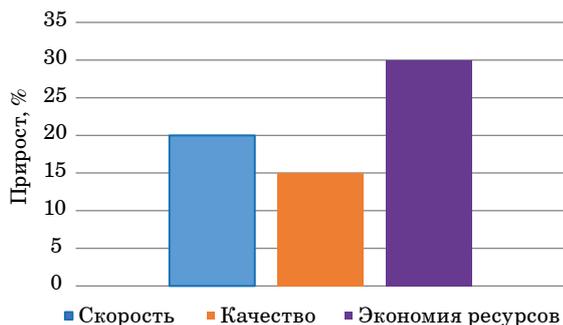
На рис. 2 показано два этапа – «До внедрения» и «После внедрения» – с соответствующими значениями стоимости производства. Мы можем увидеть уменьшение затрат на 16 %.

На рис. 3. показан прирост эффективности по трем категориям – «Скорость», «Качество» и «Экономия ресурсов».



• Рис. 2. Изменение стоимости производства, усл. ед.

• Fig. 2. Production cost change, conventional units



- *Рис. 3. Плюсы использования технологии*
- *Fig. 3. Advantages of using the technology*

Аддитивные технологии в атомной энергетике являются новаторским подходом, который используется для производства и обслуживания компонентов ядерных реакторов и связанных с ними систем [4]. Их значение для отрасли определяется возможностью создания сложных геометрических форм с высокой точностью и мини-

мальными затратами материалов, что особенно важно для деталей, функционирующих в экстремальных условиях. Высокая адаптивность аддитивных методов позволяет быстро прототипировать и изготавливать нестандартные элементы, необходимые для ремонта и модернизации оборудования. Это значительно сокращает время производственного цикла и затраты на хранение запасных частей. Аддитивные технологии также способствуют повышению надежности и безопасности ядерных объектов, благодаря способности создавать высококачественные изделия с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Дальнейшее развитие этих технологий активно поддерживается крупными игроками атомной отрасли и научными центрами, что открывает новые перспективы для оптимизации производственных процессов и внедрения новых типов реакторов. Эти реакторы направлены на увеличение энергоэффективности и снижение экологической нагрузки [5].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Каблов Е. Н.* Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестн. Российской академии наук. 2020. Т. 90, № 4. С. 331–334.
2. Аддитивные технологии при визуализации этапов развития атомной энергетики / С. О. Бояринов [и др.]. 2019. С. 146.
3. *Григорьянц А. Г.* Аддитивные технологии получения изделий из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 8. С. 18–24.
4. *Болтовская Н. А., Кропочев Е. В., Воробьева Е. С.* Основные направления инновационного развития атомной энергетики России // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий. 2020. Т. 6. С. 118.
5. *Кочеваткина Э. Ф., Кутовая А. А.* Инновационный потенциал и инвестиционная привлекательность атомной энергетики в России // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий. 2021. № 11. С. 328–333.

REFERENCES

1. *Kablov E. N.* New generation materials and digital technologies for their processing. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020;90(4):331–334. (In Russ.).
2. *Boyarinov S. O. et al.* Additive technologies in visualization of nuclear energy development stages. 2019, pp. 146. (In Russ.).
3. *Grigoryants A. G.* Additive technologies for producing composite material products. High-tech technologies in mechanical engineering. 2021;(8):18–24. (In Russ.).
4. *Boltovskaya N. A., Kropochev E. V., Vorobyova E. S.* Main directions of innovative development of Russian nuclear energy. Topical issues of innovative development of nuclear technologies. 2020;6:118. (In Russ.).
5. *Kochevatkina E. F., Kutovaya A. A.* Innovative Potential and Investment Attractiveness of Nuclear Energy in Russia. Urgent problems and development prospects of energy, engineering and technologies. 2021;(11):328–333. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шабалина Анастасия Дмитриевна, магистр кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – аддитивные технологии, бережливое производство.

Чабаненко Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – аддитивные технологии, интеллектуальные системы управления качеством.

Поступила в редакцию 05.12.2024

Поступила после рецензирования 10.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Shabalina Anastasia D., Master's Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – additive technologies, lean manufacturing.

Chabanenko Aleksandr V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – additive technologies, intelligent quality management systems.

Received 05.12.2024

Revised 10.12.2024

Accepted 21.01.2025

Цифровые двойники: революционный подход к управлению и оптимизации бизнес-процессов

Евгения Константиновна Ситкина¹

✉ citkina2002@gmail.com

Александр Валерьевич Чабаненко¹

a@chabanenko.ru, orcid.org/0000-0002-5949-6579, SPIN-код: 7009-4753

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Раскрывается тема цифровых двойников. Приведены классификация цифровых двойников и задачи, которые решаются за счет внедрения новой технологии во все сферы жизни. Также рассматривается применение цифровых двойников в различных сферах деятельности, включая медицину, образование, производство и транспорт. Описываются процесс создания цифровых двойников и их основные принципы работы.

Ключевые слова: цифровой двойник, искусственный интеллект, виртуальная модель

Для цитирования: Ситкина Е. К., Чабаненко А. В. Цифровые двойники: революционный подход к управлению и оптимизации бизнес-процессов // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 33–37. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-33-37.

Original article

Digital twins: a revolutionary approach to managing and optimizing business processes

Evgeniya K. Sitkina¹

✉ citkina2002@gmail.com

Aleksandr V. Chabanenko¹

a@chabanenko.ru, orcid.org/0000-0002-5949-6579, SPIN-code: 7009-4753

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article reveals the topic of digital twins. It provides a classification of digital twins and the tasks that are solved by introducing new technology into all spheres of life. This article examines how digital twins are used in various fields, including medicine, education, manufacturing, and transportation. It also describes the process of creating digital twins and their basic operating principles.

Keywords: digital twin, artificial intelligence, virtual model

For citation: Sitkina E. K., Chabanenko A. V. Digital twins: a revolutionary approach to managing and optimizing business processes. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):33–37. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-33-37.

Введение

Важность темы цифровых двойников неоспорима в условиях стремительного развития технологий и цифровизации во всех сферах жизни. Цифровые двойники представляют собой одну из наиболее передовых технологий современности, кардинально меняя подходы к проектированию, оптимизации и управлению различными системами и процессами.

Современные технологии стремительно меняют нашу жизнь, и одной из наиболее перспективных разработок последних лет являются цифровые двойники. Этот термин появился сравнительно недавно, но уже успел завоевать внимание специалистов различных отраслей – от ма-

шиностроения до медицины. Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию физического объекта, процесса или системы, которая позволяет моделировать поведение реального мира в цифровом пространстве. Эта технология открывает новые горизонты для инженеров, дизайнеров и производителей, позволяя оптимизировать процессы разработки, тестирования и эксплуатации продукции.

Что такое цифровой двойник?

Цифровой двойник – это динамическая цифровая модель реального объекта или системы, которая точно отражает их характеристики, по-

ведение и взаимодействие с окружающей средой. Такой двойник может быть создан на основе данных, полученных от датчиков, установленных на реальном объекте, а также на основе исторических данных о его работе. Основная цель создания цифрового двойника заключается в том, чтобы предсказать возможные сценарии развития событий, выявить потенциальные проблемы и предложить оптимальные решения еще до того, как они возникнут в реальной жизни [1].

Классификация цифровых двойников

Существует множество классификаций цифровых двойников (рис. 1), как и определений этого термина (таблица).

Виртуальные модели активно применяются в производстве разнообразной продукции. В настоящее время выделяют несколько типов цифро-



• Рис. 1. Классификация цифровых двойников
 • Fig. 1. Classification of digital twins

- Типы цифровых двойников
- Types of digital doubles

Тип	Описание
Прототип	Представляет собой подробное описание материального объекта, включающее в себя информационные наборы, необходимые для его создания и функционирования. Наборы данных охватывают различные аспекты, такие как требования, спецификации, процессы и услуги, обеспечивая основу для разработки физического аналога
Экземпляр	Представляет собой детализированное представление конкретного физического изделия, с которым он связан на протяжении всего его жизненного цикла. Подобный тип цифрового двойника может включать в себя разнообразные данные в зависимости от целей и задач, для которых он создается. К основным элементам могут относиться: 1) трехмерная модель, которая визуализирует геометрию и структуру физического объекта вместе с его компонентами; 2) перечень операций и процессов, которые были выполнены при создании этого объекта, а также результаты измерений и тестов, проводимых на образце, что позволяет оценить его качество и функциональность; 3) данные о рабочих состояниях, полученные с помощью различных датчиков, что дает возможность отслеживать эксплуатационные характеристики изделия в реальном времени. На основе одного оригинального прототипа могут быть изготовлены несколько отдельных физических объектов. Каждый из этих объектов будет иметь свой уникальный экземпляр цифрового двойника, что позволяет проводить анализ и мониторинг их работы в индивидуальном порядке, улучшая контроль за качеством и эксплуатационными характеристиками изделий
Агрегатор	Представляет собой комплексный цифровой двойник, который объединяет данные всех версий и моделей. Имеет доступ ко всем виртуальным моделям и может запрашивать информацию о совокупности объектов. Регулярно мониторит данные с датчиков, сравнивая текущие показания с теми, которые были зарегистрированы в момент возникновения сбоев

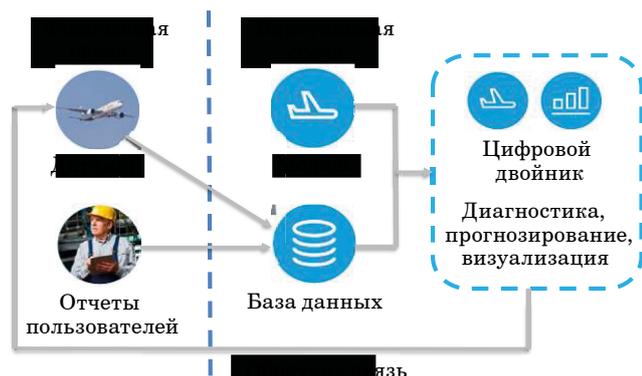


• Рис. 2. Типы цифровых двойников в зависимости от области построения
 • Fig. 2. Types of digital doubles depending on the construction area

вых двойников в зависимости от области их применения (рис. 2) [2].

Пример цифрового двойника

Рассмотрим пример цифрового двойника, созданный на основе имеющихся датчиков на борту самолета (рис. 3). Для реализации цифрового двойника необходимо собрать информацию с реального объекта, данные о конструкции самолета, включая чертежи, материалы, размеры и характеристики компонентов, а также эксплуатационные данные, такие как история полетов, нагрузки, характеристики систем. Необходимо установить сенсоры на реальный самолет для мониторинга состояния в реальном времени (температура, давление, вибрации и т. д.) и настроить



- Рис. 3. Пример цифрового двойника самолета
- Fig. 3. An example of a digital twin of an airplane

системы сбора и передачи данных в облако или локальную базу данных. На основе полученных данных с помощью CAD-программ создается виртуальная модель самолета для оценки аэродинамических характеристик и поведения самолета в разных условиях. Благодаря собранным данным и созданной модели, операторы и инженеры могут в режиме реального времени видеть состояние самолета, что помогает вносить коррективы в модель, проводить анализ систем и своевременно принимать решения.

Основные компоненты цифрового двойника

1. Физическая система – реальный объект или процесс, который подлежит моделированию.
2. Виртуальная модель – цифровая копия физической системы, включающая в себя математические модели, алгоритмы и данные.
3. Данные и аналитика – информация, поступающая от физических сенсоров и других источников, используется для обновления и корректировки виртуальной модели.
4. Интерфейсы взаимодействия – средства связи между физическим объектом и его цифровым двойником, обеспечивающие обмен данными в режиме реального времени [3].

Применение цифровых двойников

Цифровые двойники находят применение в самых разных отраслях промышленности и науки. Вот несколько примеров использования этой технологии.

Производства большого масштаба. Использование технологий цифровых двойников открывает новые горизонты в моделировании как

отдельных компонентов, так и целых производственных процессов. Это позволяет проводить виртуальные испытания, что, в свою очередь, помогает предотвращать поломки оборудования и снижать затраты на аварийные ремонты [4].

Энергетика. Цифровые двойники помогают оптимизировать работу электростанций и распределительных сетей. Моделирование поведения энергокомплекса позволяет прогнозировать нагрузки, предотвращать аварии и минимизировать потери энергии. Кроме того, использование цифровых двойников способствует развитию возобновляемых источников энергии, таких как солнечные и ветряные станции, за счет точного расчета производительности и эффективности оборудования.

Медицина. Цифровые двойники применяются для создания моделей органов и систем человеческого организма. Такие модели позволяют врачам проводить виртуальные операции: находясь в виртуальном пространстве, они могут взаимодействовать с виртуальными объектами с помощью контроллеров, жестов или других устройств, что позволяет проиграть различные сценарии для изучения поведения объектов и процессов в условиях, близких к реальным, тестировать новые методы лечения и разрабатывать индивидуальные планы терапии для пациентов. Также цифровые двойники используются в разработке медицинских устройств и имплантатов, обеспечивая высокую точность и безопасность их применения [5].

Преимущества использования цифровых двойников

Применение цифровых двойников дает множество преимуществ, среди которых:

- 1) сокращение затрат: благодаря возможности тестирования и оптимизации продуктов на стадии разработки, компании могут избежать дорогостоящих ошибок и переделок;
- 2) повышение качества: точное моделирование реальных условий эксплуатации помогает создавать более надежные и долговечные изделия;
- 3) оптимизация производственных процессов: цифровые двойники позволяют анализировать и совершенствовать производственные цепочки будущего.

Мы можем ожидать дальнейшего расширения областей применения цифровых двойников и их интеграции в повседневную жизнь. По мере совершенствования технологий и увеличения доступности данных цифровые двойники будут становиться неотъемлемой частью нашей реаль-

ности, помогая нам решать сложные задачи и повышая качество жизни [6].

Заключение

Цифровые двойники представляют собой революционную технологию, которая изменяет подход к проектированию, производству и эксплуатации различных объектов и систем. Они открывают новые возможности для оптимизации процессов, сокращения затрат и повышения качества продукции. Несмотря на существующие

вызовы, такие как обработка больших объемов данных и обеспечение безопасности, перспективы развития этой технологии остаются чрезвычайно многообещающими.

В ближайшие годы мы можем ожидать дальнейшего распространения цифровых двойников в различных сферах деятельности, начиная от машиностроения и энергетики и заканчивая медициной и сельским хозяйством. Интеграция цифровых двойников в повседневную жизнь станет важным шагом на пути к созданию «умного» и устойчивого общества будущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аллакулиев М., Батырова А., Аннабаев С. Цифровые двойники: ключ к цифровой трансформации // Символ науки: междунар. науч. журн. 2024. Т. 1, № 10-2. С. 40–41.
2. Кокорев Д., Юрин А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Экономика и бизнес. 2019.
3. Идеальная копия: какие задачи решают цифровые двойники в разных отраслях. URL: <https://sb-er.pro/publication/idealnaya-kopiya-kakie-zadachi-reshayut-tsifrovie-dvoyniki-v-r-aznih-otraslyah/> (дата обращения: 21.11.2024).
4. Цифровые двойники: как интернет вещей предотвращает аварии на производстве. URL: <https://clo-ud.vk.com/blog/cifrovye-dvoyniki-internet-veshchej-predotvrashchaet-avarii> (дата обращения: 19.11.2024).
5. Что такое цифровые двойники и где их используют. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb> (дата обращения: 19.11.2024).
6. Концепция цифрового двойника: что это такое и какие задачи он помогает решать бизнесу. URL: <https://platrum.ru/blog/koncepcija-cifrovogo-dvojnika-cto-jeto-takoe-i-kakie-zadachi-on-pomogaet-reshat-biznesu> (дата обращения: 21.11.2024).

REFERENCES

1. Allakuliev M., Batyrova A., Annabaev S. Digital twins: the key to digital transformation. Symbol of science: international scientific journal. 2024;1(10-2):40–41. (In Russ.).
2. Kokorev D., Yurin A. Digital twins: concept, types and advantages for business. Economics and business 2019. (In Russ.).
3. The perfect copy: what tasks are solved by digital twins in different industries. Available from: <https://sb-er.pro/publication/idealnaya-kopiya-kakie-zadachi-reshayut-tsifrovie-dvoyniki-v-r-aznih-otraslyah> [Accessed 21 November 2024].
4. Digital twins: how the Internet of Things prevents accidents at work. Available from: <https://clo-ud.vk.com/blog/cifrovye-dvoyniki-internet-veshchej-predotvrashchaet-avarii> [Accessed 19 November 2024].
5. What are digital doubles and where are they used. Available from: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb> [Accessed 21 November 2024].
6. The concept of a digital twin: what is it and what tasks it helps businesses solve. Available from: <https://platrum.ru/blog/koncepcija-cifrovogo-dvojnika-cto-jeto-takoe-i-kakie-zadachi-on-pomogaet-reshat-biznesu> [Accessed 21 November 2024].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ситкина Евгения Константиновна, магистрант кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Sitkina Evgeniya K., Master's Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Область научных интересов – моделирование и симуляция физических объектов и систем в цифровом формате.

Чабаненко Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – аддитивные технологии, интеллектуальные системы управления качеством.

Поступила в редакцию 16.12.2024

Поступила после рецензирования 19.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Research interests – modeling and simulation of physical objects and systems in digital format.

Chabanenko Aleksandr V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – additive technologies, intelligent quality management systems.

Received 16.12.2024

Revised 19.12.2024

Accepted 21.01.2025

Роботизированный комплекс селективной пайки выводных электронных компонентов для предприятий электронной промышленности

Павел Андреевич Сергеев¹

✉ pavel.sergeev@mgbot.ru, SPIN-код: 9348-1560

Сергей Валентинович Солёный¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-код: 3957-5891, Author ID: 910148

Алексей Павлович Бобрышов¹

ap.bobryshov@mail.ru, orcid.org/0009-0009-6220-8206, SPIN-код: 2630-5787, Author ID: 1126665

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены основные конструктивные элементы роботизированного комплекса селективной пайки. Приведено сравнение комплекса с аналогичным оборудованием. Описан опыт внедрения на производстве электроники и перспективы развития проекта.

Ключевые слова: электронная промышленность, электроника, производство, робототехника, селективная пайка, производительность труда

Для цитирования: Сергеев П. А., Солёный С. В., Бобрышов А. П. Роботизированный комплекс селективной пайки выводных электронных компонентов для предприятий электронной промышленности // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 38–43. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-38-43.

Original article

Robotic complex for selective soldering of pin electronic components for electronic industry enterprises

Pavel A. Sergeev¹

✉ pavel.sergeev@mgbot.ru, SPIN-code : 9348-1560

Sergey V. Solyonyj¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-code: 3957-5891, Author ID: 910148

Aleksey P. Bobryshov¹

ap.bobryshov@mail.ru, orcid.org/0009-0009-6220-8206, SPIN-code: 2630-5787, Author ID: 1126665

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The main structural elements of a robotic selective soldering complex are considered. The comparison of the complex with similar equipment is given. The experience of implementation in the production of electronics and the prospects for the development of the project are described.

Keywords: electronic industry, electronics, manufacturing, robotics, selective soldering, labor productivity

For citation: Sergeev P. A., Solyonyj S. V., Bobryshov A. P. Robotic complex for selective soldering of pin electronic components for electronic industry enterprises. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):38–43. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-38-43.

Введение

Современная промышленность все чаще сталкивается с дефицитом кадров. И, соответственно, повышается интерес к роботизированным комплексам, способным повысить производительность труда [1].

Выводные электронные компоненты (ЭК) – это электронные компоненты, имеющие электриче-

ские выводы в виде протяженных (проволочных) проводников, которые устанавливаются в монтажные отверстия печатной платы. В процессе пайки происходит оплавление припоя, заполняющее отверстия с выводами ЭК, в результате чего происходит фиксация ЭК на печатной плате.

Селективная пайка выводных компонентов – это метод пайки ЭК, при котором осуществляется выборочная пайка компонентов с контакт-

ными площадками печатной платы посредством локального нагрева и применения мини-волны припоя, которую еще называют «каплей припоя». Этот процесс отличается точностью и гибкостью, позволяя производить пайку только тех участков схемы, которые указаны в программе, без необходимости подвергать всю плату термической обработке. Применение оборудования для осуществления селективной пайки обеспечивает высокую надежность и качество соединений, особенно в условиях плотной компоновки элементов на плате [2].

В компании ООО «Макро Солюшнс» создан роботизированный комплекс селективной пайки (РКСП) [1], точное название разработанного комплекса – «РКСП-23». Он осуществляет точную пайку выводных ЭК на печатную плату. Внедрение на предприятие такого робота позволяет снизить зависимость от ручного труда монтажников, при этом возникает спрос на операторов технологических линий и наладчиков оборудования. Ввиду того, что вклад в себестоимость единицы изделия от труда сотрудников последних двух специальностей меньше, чем от монтажников, то в целом достигается эффект увеличения производительности труда.

Цель исследования – создание и развитие робототехнических систем, способных повышать производительность труда на предприятиях электронной промышленности.

Объект исследования – системы селективной пайки выводных ЭК.

Предмет исследования – РКСП-23.

Задачи исследования: обзор конструкции РКСП-23, сравнение с аналогами, оценка опыта внедрения и описание дальнейших перспектив развития проекта.

Конструкция роботизированного комплекса

РКСП-23, показанный на рис. 1, состоит из робота-манипулятора (1), паяльного модуля (2), промышленного логического контроллера (ПЛК) (3), контура безопасности (4) и различных вспомогательных модулей (5).

Робот-манипулятор (РМ) – один из важнейших элементов системы. Используется шестиосевой промышленный РМ производства компании *Kawasaki* (Япония) или коллаборативный РМ производства компании *Dobot* (Китай). Команда ООО «Макро Солюшнс» может использовать РМ и других производителей в зависимости от технико-экономических параметров производственной линии, в которую встраивается РКСП-23.



• *Рис. 1. Конструкция РКСП-23*
• *Fig. 1. Design of RKSP-23*

Паяльный модуль производства компании *JBC* представляет собой рабочий инструмент, который крепится на РМ. В нем имеются паяльное жало и система подачи припоя, управляемая при помощи собственного контроллера. Модулем можно управлять с персонального компьютера как с помощью программного обеспечения, так и с помощью встраиваемого внешнего контроллера. На рис. 2 показана система пайки. Обычно инженеры-разработчики и технологи называют данный рабочий инструмент «паяльной головой» [3].

ПЛК осуществляет связь контроллера робота с системой пайки. В данном комплексе используется отечественный контроллер ПЛК200 производства компании «ОВЕН».

Контур безопасности представляет собой каркас из алюминиевого профиля со вставками из органического стекла, он предотвращает внезапное проникновение человека внутрь роботизированного комплекса во время рабочего процесса.



• *Рис. 2. Паяльный модуль (рабочий инструмент)*
• *Fig. 2. Soldering module (working tool)*

Для доступа к паяльному оборудованию имеются дверцы, они снабжены концевыми выключателями. Во время работы РКСП дверцы закрыты, что ограждает человека от прямого контакта с РМ и рабочим инструментом. Если случайно человек откроет дверцу во время работы комплекса, то сработают концевые выключатели и РМ остановится, что делает систему безопасной. Также на каждой стороне имеются кнопки аварийного выключения.

Среди различных вспомогательных узлов и модулей можно выделить такие, как пневматическая система, НМИ (Human-machine interface) – рабочая панель оператора, система электропитания и др.

Принцип работы

Последовательность организации процесса работы РКСП можно разделить на следующие стадии:

- 1) установка выводных ЭК на печатную плату «Набивка ЭК»;
- 2) установка печатных плат с компонентами в оснастку;
- 3) нанесение паяльного флюса;
- 4) подача оснастки в рабочее поле РМ;
- 5) РКСП осуществляет процесс пайки ЭК на печатную плату;
- 6) извлечение готовых электронных модулей.

Стадии 1, 2, 3 выполняются человеком. Стадии 4, 6 относятся к операциям, которые могут быть роботизированы согласно распространенному варианту роботизации «загрузка – выгрузка станка». Качество пайки РКСП соответствует уровню

ручного монтажа или пайки селективной установкой «капля припоя». Внешний вид платы показан на рис. 3.

Сравнение с аналогами

В табл. 1 приведено сравнение РКСП с установками селективной пайки «капля припоя» и пайкой волной припоя, а также с трехосевыми паяльными роботами (производство – Китай) и монтажом ручным способом.

Среди возможных вариантов организации автоматической селективной пайки стоимость РКСП-23 примерно 8–10 млн рублей является оптимальной. Стоимость установки пайки волной припоя или «капель припоя» – 20–30 млн рублей, а стоимость технического обслуживания (ТО) значительно превышает все другие перечисленные методы, поскольку используется дорогой припой и инертные газы.



- Рис. 3. Качество пайки электронного модуля для компании ООО «МГБот» при помощи РКСП-23
- Fig. 3. Soldering quality of the electronic module for the company MGBot LLC using RCSP-23

- Таблица 1. Сравнение различных методов селективной пайки
- Table 1. Comparison of various selective soldering methods

Метод селективной пайки	Преимущества	Недостатки
РКСП-23	Высокая скорость пайки. Высокая степень селективности. Компактность	Стоимость оборудования значительно выше ручного монтажного участка
Установка селективной пайки «капля припоя»	Высокая скорость пайки	Высокая стоимость оборудования. Большие габариты. Дорогое обслуживание
Пайка волной припоя	Самая высокая скорость пайки	Высокая стоимость оборудования. Большие габариты. Дорогое обслуживание. Низкая селективность
Трехосевыми паяльными роботами (производство – Китай)	Высокая скорость пайки. Низкая стоимость	Низкая надежность
Ручной монтаж	Низкая стоимость оснащения рабочего места. Высокая степень селективности	Низкая скорость. Дефицит рабочих-монтажников

В сравнении с китайскими трехосевыми паяльными станциями, РКСП имеет преимущество в бóльшей надежности работы, повышенной скорости пайки и более высокой селективности, поскольку в РКСП-23 используется шестиосевая РМ, что позволяет осуществлять пайку более сложных ЭК.

В сравнении с ручным монтажом, РКСП показывает бóльшую скорость пайки, но стоит отметить, что оснащение рабочего места монтажника ЭК стóит значительно меньше. В то же время дефицит кадров способствует повышению спроса на роботизированные решения.

Были проведены расчеты стоимости монтажа одной печатной платы, в качестве примера взят монтаж платы расширения I2C MGB-D14 для компании ООО «МГБот» (табл. 2; 3). Был осуществлен монтаж ручным способом, установкой селективной пайки «капля припоя» и РКСП-23. При работе дневной сменой смогли осуществить пайку 208 плат на РКСП-23, но при этом установка «капля припоя» смогла сделать немного больше – 218 таких электронных модулей. На оборудовании работал один человек, который осуществлял «набивку» ЭК и загрузку оборудования. Ручным методом удалось спаять только 40 плат.

Таким образом, РКСП с одним оператором-набивщиком заменяет работу пяти монтажников ЭК. Расчет приведен в табл. 3.



• *Рис. 4. РКСП-23 на производстве ООО «Макро EMC»*
 • *Fig. 4. RCSP-23 manufactured by “Makro EMS LLC”*

- *Таблица 2. Сравнение различных методов пайки за десять лет работы*
- *Table 2. Comparison of different soldering methods for ten years of operation*

Сравнительная характеристика	Ручной труд (паяльная станция)	Установка селективной пайки «капля припоя»	Робототехнический комплекс РКСП-23-К
Стоимость оборудования, р.	8000	20 000 000	9 000 000
Стоимость ТО за год, р.	2000	400 000	90 000
Фонд оплаты труда в год, р.	2 000 000	2 800 000	1 400 000
Итого затраты через десять лет, р.	20 100 000	52 000 000	23 900 000
Стоимость монтажа одной платы, р.	157	159	150

- *Таблица 3. Сравнение различных методов пайки за одну рабочую смену*
- *Table 3. Comparison of different soldering methods in one work shift*

Сравнительная характеристика	Ручной труд (паяльная станция)	Установка селективной пайки «капля припоя»	Робототехнический комплекс РКСП-23-К
Мобильность оборудования	Да	Нет	Да
Количество обслуживающего персонала, человек	1	2	1
Многофункциональность оборудования	Нет	Нет	Да
Время монтажа одной платы (86 точек пайки)	12 мин	2 мин 12 с	2 мин 18 с
Количество плат, изготовленных за смену (8-часовой рабочий день), шт.	40	218	208

Опыт внедрения

Первое внедрение РКСП было на предприятии ООО «Макро ЕМС» (Санкт-Петербург) (рис. 4). Причиной для такого заказа явился дефицит квалифицированных монтажников ЭК.

Перспективы развития проекта

На сегодняшний день роботизированный комплекс изготавливается для различных заказчиков. В конструкцию изделия периодически вносятся улучшающие изменения. Приведем поэтапное развитие проекта в хронологическом порядке и планы на будущее:

2023 г. – создание первого рабочего изделия;

2024 г. – начаты работы по автоматизации флюсования и перемещению заготовок;

2025 г. – план внедрения программы для быстрой записи точек пайки;

2026 г. – план внедрения технического зрения для контроля качества пайки;

2030 г. – план роботизации формовки и установки ЭК.

Заключение

Проведенное исследование показало высокую эффективность использования роботизированного комплекса селективной пайки РКСП-23, раз-

работанного компанией ООО «Макро Солюшнс». Комплекс обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогичными системами, такими как высокая точность пайки, возможность пайки различных типов выводов и гибкость настройки параметров процесса. Опыт внедрения на производственных линиях подтвердил снижение зависимости от ручного труда монтажников, что позволило уменьшить затраты на оплату труда и увеличить общую производительность труда на предприятии.

Вместе с тем выявлены некоторые аспекты, требующие дополнительного внимания. Это касается необходимости обучения персонала работе с новым оборудованием, а также возможных технических сложностей, связанных с настройкой и обслуживанием комплекса. Однако эти вопросы могут быть решены путем проведения соответствующих тренингов и оптимизации процедур эксплуатации.

Перспективы развития проекта включают в себя дальнейшее улучшение программного обеспечения управления процессом пайки, интеграцию с системами автоматического контроля качества и расширение функциональности комплекса для работы с более широким спектром электронных компонентов. Таким образом, внедрение и развитие подобных роботизированных систем представляют собой важный шаг к повышению конкурентоспособности предприятий электронной промышленности и обеспечению устойчивого роста производительности труда.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сайт компании ООО «Макро Солюшнс». URL: <https://macrosolutions.ru/rtk-for-soldering> (дата обращения: 16.11.2024).
2. Шведюк Г. Селективная пайка навесных компонентов мини-волной припоя // Компоненты и технологии. 2004. № 4. С. 204–205.
3. Колесников Е. Система роботизированной пайки – надежный помощник человека в процессах пайки // Вектор высоких технологий. 2024. № 1 (59). С. 46–51.

REFERENCES

1. The website of the company “Macro Solutions” LLC. Available from: <https://macrosolutions.ru/rtk-for-soldering> [Accessed 16 November 2024].
2. Shvedyuk G. Selective soldering of mounted components of a mini-solder. Components and technologies. 2004;(4):204–205. (In Russ.).
3. Kolesnikov E. The robotic soldering system is a reliable human assistant in soldering processes. Vector of high technologies. 2024;(1(59)):46–51. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергеев Павел Андреевич, аспирант, заведующий лабораторией промышленной электроники Инженерной школы Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроника, микроэлектроника, робототехника, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект, организация производства, Интернет вещей, светотехника, электронное машиностроение.

Солёный Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, робототехника, информационная безопасность, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект.

Бобрышов Алексей Павлович, ассистент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, цифровые технологии, робототехника, электроснабжение энергетических систем, электрические контрольно-измерительные приборы, поверка, статистика, электроника, качество продукции, организация автоматизированной поверки.

Поступила в редакцию 16.12.2024

Поступила после рецензирования 20.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Sergeev Pavel A., Postgraduate Student, Head at the Laboratory of Industrial Electronics at the Engineering School, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electronics, microelectronics, robotics, technological entrepreneurship, artificial intelligence, production organization, Internet of Things, lighting engineering, electronic engineering.

Solyonyj Sergey V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electrical power engineering, electromechanics, automation, robotics, information security, technological entrepreneurship, artificial intelligence.

Bobryshov Aleksey P., Assistant at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power industry, electromechanics, automation, digital technologies, robotics, power supply of energy systems, electrical control and measuring devices, verification, statistics, electronics, product quality, organization of automated verification.

Received 16.12.2024

Revised 20.12.2024

Accepted 21.01.2025

Проектирование USB-осциллографа и исследование его метрологических характеристик

Тамара Прохоровна Мишура¹

✉ t_mishura@mail.ru, orcid.org/0000-0001-6003-3822, SPIN-код: 8236-3733

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена проектированию точного, компактного, быстродействующего, но в то же время имеющего низкую стоимость разработки USB-осциллографа. Такой прибор можно использовать для исследования сигналов разных форм. Он способен сохранять полученную в процессе измерений информацию для дальнейшего анализа и сравнения различных сигналов. USB-осциллограф, представляющий собой виртуальный прибор, удобно применять в сложной измерительной системе, например, в комплексе для проведения регламентных и ремонтных работ готового электронного оборудования. Такие характеристики, как компактность, простота в использовании и возможность подключения к компьютеру, делают его незаменимым помощником специалистов в области электроники. Проектирование виртуальных приборов является перспективным путем развития измерительной техники и измерительных систем по причине имеющихся преимуществ по отношению к другим типам средств измерений.

Ключевые слова: USB-осциллограф, виртуальные приборы, метрологические характеристики

Для цитирования: Мишура Т. П. Проектирование USB-осциллографа и исследование его метрологических характеристик // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 44–48. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-44-48.

Original article

Designing a USB oscilloscope and studying its metrological characteristics

Tamara P. Mishura¹

✉ t_mishura@mail.ru, orcid.org/0000-0001-6003-3822, SPIN-code: 8236-3733

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This work is devoted to the design of an accurate, compact, high-speed, but at the same time low-cost USB oscilloscope development. Such a device can be used to study signals of various forms. It is capable of storing information obtained during the measurement process for further analysis and comparison of various signals. A USB oscilloscope, which is a virtual instrument, is convenient to use in a complex measuring system, for example, in a complex for carrying out routine maintenance and repair work on finished electronic equipment. Such characteristics as compactness, ease of use and the ability to connect to a computer make it an indispensable assistant for specialists in the field of electronics. The design of virtual instruments is a promising way of developing measuring technology and measuring systems due to the existing advantages in relation to other types of measuring instruments.

Keywords: USB oscilloscope, virtual instruments, metrological characteristics

For citation: Mishura T. P. Designing a USB oscilloscope and studying its metrological characteristics. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):44–48. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-44-48.

В настоящее время особенно актуальным и крайне необходимым является широчайшее использование точных, компактных, быстродействующих USB-осциллографов. Такие осциллографы имеются в продаже. Все они имеют достаточно высокую полосу пропускания и, как следствие, большую стоимость (табл. 1).

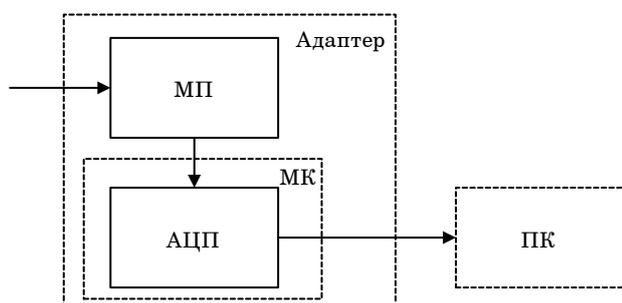
Существует потребность в дешевых приборах с небольшой полосой пропускания, компактным корпусом и удобным интерфейсом [1, 2].

Проектирование такого осциллографа [3, 4] начинается с разработки структурной схемы (рис. 1).

Адаптер, состоящий из масштабных преобразователей (МП), ограничивает уровни напряжения сигнала с целью корректной работы микроконтроллера (МК). Микроконтроллер [5], в состав которого входит аналого-цифровой преобразователь (АЦП), является ядром адаптера и преобразует поступающий аналоговый сигнал в цифровой, который далее отправляется через устройство выхода на персональный компьютер (ПК). Одной из основных метрологических характеристик проектируемого устройства является полоса пропускания. Ее определяет частота дискретизации микроконтроллера. На современном рынке существует

• Таблица 1. Типы USB-осциллографов и их характеристики
 • Table 1. Types of USB oscilloscopes and their characteristics

Характеристика	VDS6102A	ACK-3002	DS8034-R
Полоса пропускания частот, МГц	100	100	350
Диапазон измеряемых напряжений	2 мВ/дел ~ 5 В/дел	10 мВ/дел...5 В/дел	2 мВ/дел ~ 5 В/дел
Цена, р.	37 420	34 776 .	521 352



• Рис. 1. Структурная схема USB-осциллографа. Пояснения даны в тексте
 • Fig. 1. Block diagram of a USB oscilloscope. Explanations are given in the text

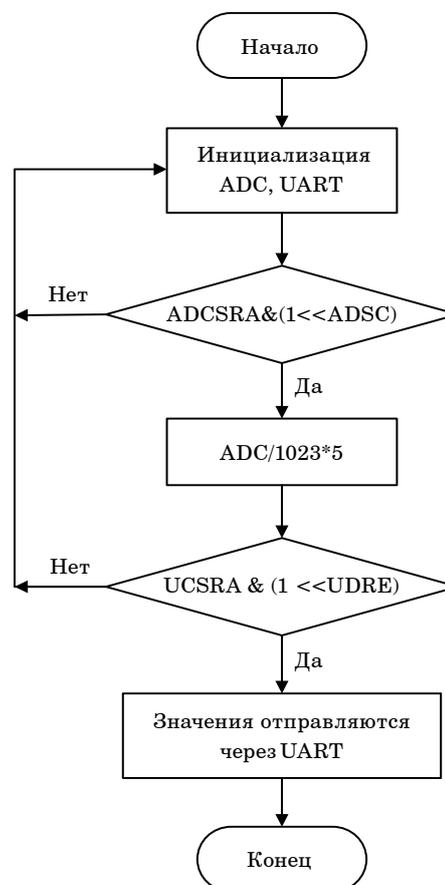
несколько семейств микроконтроллеров, пользующихся популярностью благодаря своему удобству и функциональным возможностям. Примеры микроконтроллеров из этих семейств и их характеристики приведены в табл. 2.

По функциональным особенностям, наилучшему соотношению «быстродействие/энергопотребление», удобству прошивки и эксплуатации для проектирования был выбран микроконтроллер Atmega16. Программа [6, 7], по которой он работает, пишется на основе разработанного алгоритма (рис. 2).

В блоке **Инициализация ADC, UART** происходит подключение библиотек, необходимых для работы программы, инициализация АЦП и интерфейса UART. Блок **ADCSRA & (1 << ADSC)** анализирует поступление сигнала на вход АЦП. При поступлении сигнала на вход АЦП разрешается его использование, и запускается преобразование аналогового сигнала в цифровой код. По окончании преобразования код АЦП записывается в регистр **ADC**, и запускается прерывание, в котором отработывается подпрограмма **ADC/1023*5**. Подпрограмма преобразовывает цифровой код в единицы физической величины. Блок **UCSRA & (1 << UDRE)** анализирует освобождение регистра **UDR**, в котором хранятся данные для отправки по интерфейсу **UART**

• Таблица 2. Типы микроконтроллеров
 • Table 2. Types of microcontrollers

Характеристика	Atmega16	STM32	PIC16F628A
Серия	avratmega	stm32 f1	pic 16favr
Ядро	avr	arm cortex-m3	pic
Ширина шины данных, бит	8	32	8
Тактовая частота, МГц	16	72	20
Наличие аналого-цифровых (АЦП) / цифроаналоговых (ЦАП) преобразователей	АЦП 8x10b	АЦП 6x10b	АЦП 6x10b
Напряжение питания, В	4,5...5,5	2,4...5,5	1,8...5,5
Частота дискретизации	15 Квыб./с	1 Мвыб./с	10 Квыб./с
Разрядность АЦП, бит	10	12	10
Встроенные интерфейсы	i2c, spi, uart	i2c, spi, uart	i2c, spi, uart



• Рис. 2. Алгоритм работы микроконтроллера
 • Fig. 2. Microcontroller operating algorithm

в компьютер. При освобождении регистра в разряд UDRE регистра UCSRA записывается «1», и регистр UDR записывает новые данные, а старые данные отправляются по интерфейсу UART в компьютер (это осуществляется в блоке **Значения отправляются через UART**).

В соответствии с разработанным алгоритмом работы контроллера, для прошивки микроконтроллера понадобится программное обеспечение для компиляции кода прошивки в исполняемый файл (*.hex). Для этого были выбраны программа Code Vision AVR, интегрированная среда разработки программного обеспечения для микроконтроллеров семейства AVR фирмы *Atmel*.

Пакет программ для автоматизированного сквозного проектирования электронных схем [7–9] Proteus позволяет собрать схему осциллографа вместе с микроконтроллером, осуществить его прошивку, дальнейшую отладку, а также симулировать работу всего устройства. При необходимости на основе этой схемы можно создать печатную плату для изготовления реального устройства. Результат работы устройства в программе показан на рис. 3.

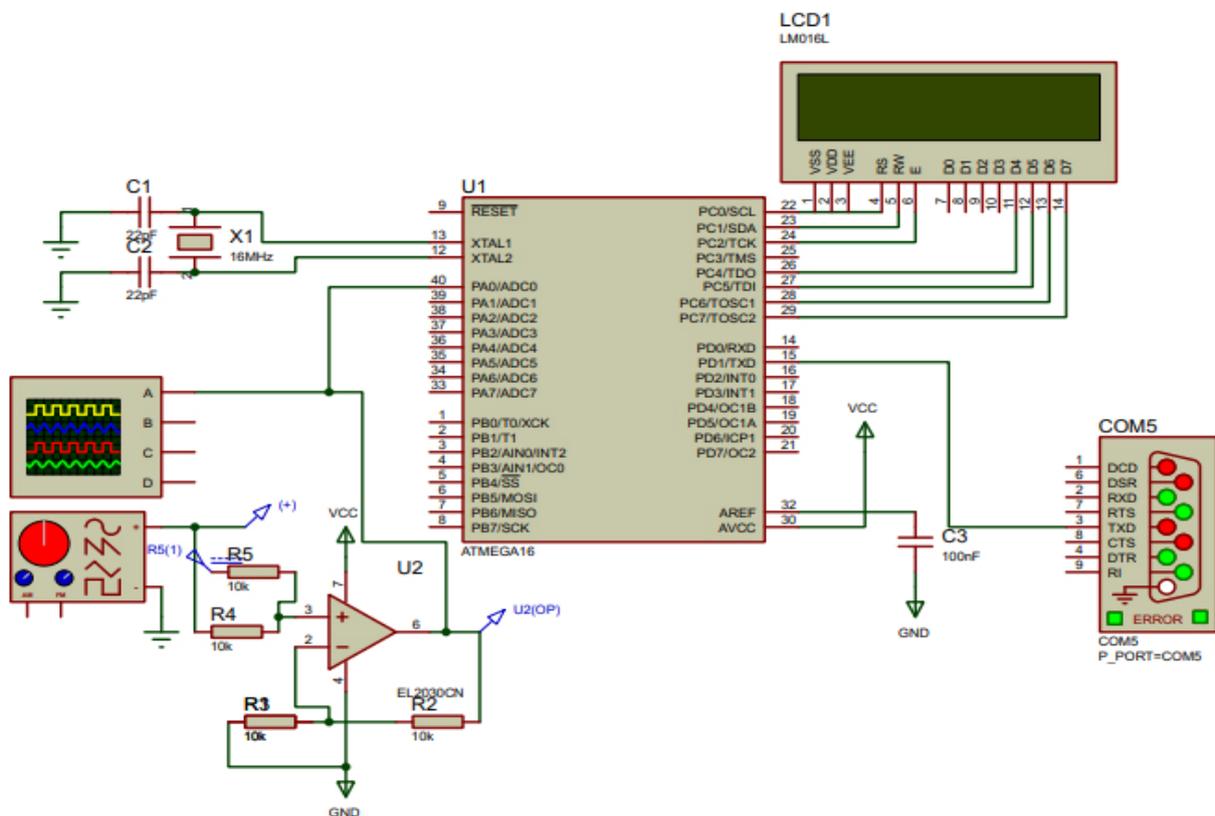
Для обеспечения возможности проверки правильности прошивки и исправности работы микропроцессора к нему были подключены генератор сигнала, а также осциллограф для контроля сигнала, поступающего на микроконтроллер.

Сигнал с генератора поступает на вход АЦП микроконтроллера – PC0/ADC0, а после преобразования подается с выхода TXD микроконтроллера на вход RXD устройства COMPM, связывающего программу с COM-портом.

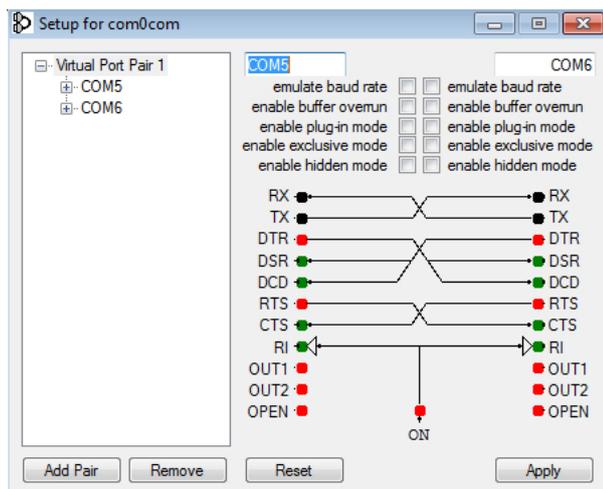
Программа для USB-осциллографа разработана в среде LabView. Данные с микроконтроллера подаются через интерфейс UART (COM-порт), загружаются в программу на персональный компьютер и обрабатываются. В программе также присутствует функция сохранения сигнала в виде скриншота.

Чтобы соединить COM-порты программ Proteus и LabView, использовали программу com0com. С ее помощью создается виртуальная пара последовательных портов (порты 5, 6), с помощью которых обеспечивается связь симулируемой в Proteus схемы адаптера и программы осциллографа в LabView. Интерфейс программы показан на рис. 4.

Перед запуском устройства нужно произвести настройку COMPM, установить номер порта (порт 5), скорость передачи – 9600 Б/с.



• Рис. 3. Электронная модель USB-осциллографа в программе Proteus 8 Professional
 • Fig. 3. Electronic model of a USB oscilloscope in Proteus 8 Professional

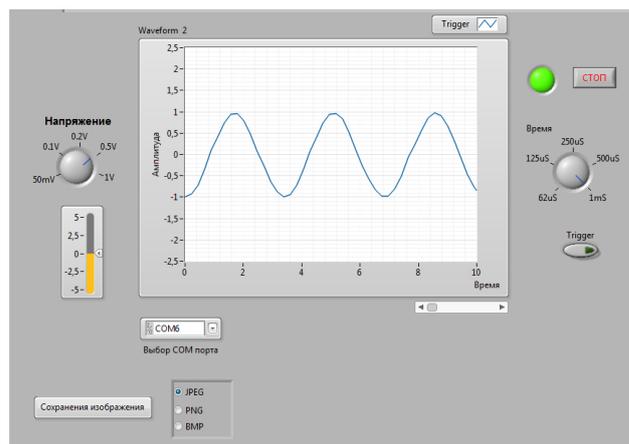


• Рис. 4. Интерфейс программы com0com
 • Fig. 4. Interface of the com0com program

Передняя панель реализации работы осциллографа после запуска программы в LabView показана на рис. 5.

На передней панели выбираем порт COM6, через который будет поступать код в программу. После запуска программы с установленными пределами напряжения 0,5 В, длительности 1 мс на экране осциллографа появится график синусоидального сигнала амплитудой 1 В, периодом 0,01 с, что эквивалентно частоте 100 Гц. Разрабатываемый прибор будет иметь полосу пропускания частот до 8 МГц и размер входного сигнала до 20 В.

Примерный расчет затрат на изготовление одного изделия показал, что себестоимость одной единицы составит 4532 рубля, что является



• Рис. 5. Передняя панель LabView после запуска программы
 • Fig. 5. LabView front panel after starting the program

существенным преимуществом перед дорогостоящими средствами измерений.

Таким образом, созданная для симуляции в Proteus схема адаптера и программа для USB-осциллографа в LabView проверены на работоспособность. Такой виртуальный осциллограф можно объединить в сложную измерительную систему, например, ремонтный комплекс, что позволит облегчить проведение регламентных и ремонтных работ готовых электронных изделий. Такие характеристики, как компактность, простота в использовании и возможность подключения к компьютеру, делают его незаменимым помощником специалистов в области электроники. Подобный осциллограф способен сохранять полученную в процессе измерений информацию для дальнейшего анализа и сравнения различных сигналов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мишура Т. П., Александрова С. А. Реализация портативного цифрового частотомера на микроконтроллере atmega1284p // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Междунар. форум (СПб., 4–5 апр. 2020 г.). СПб.: ГУАП, 2020. С. 16–17.
2. Сурмило А. А., Мишура Т. П. Разработка цифрового фазовращателя // III Междунар. конкурс науч.-исслед. работ (г. Уфа, 20 нояб. 2020 г.). Уфа: Вестник науки, 2020. С. 29–35.
3. Сабунин А. Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. URL: <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/altium-designer-novye-resheniya/> (дата обращения: 10.11.2024).
4. Котович В. В., Назаргулов И. Р., Немилостив И. Ю. Обучающий программно-аппаратный комплекс для проектирования цифровых измерительных устройств // 73-я Междунар. студе. науч. конф. ГУАП: сб. докл. Ч. 2: Техн. науки. СПб.: ГУАП, 2020. С. 202–206.
5. Рюмик С. М. 1000 и одна микроконтроллерная схема // Программируемые системы. 2016. № 3. URL: https://vk.com/wall-43363264_432520 (дата обращения: 15.11.2024).
6. Матюшин А. О. Программирование микроконтроллеров: стратегия и тактика. М.: ДМК Пресс, 2021. 358 с.
7. Алехин В. А. Микроконтроллеры PIC: основы программирования и моделирования в интерактивных средах MPLAB IDE, mikroC, TINA, Proteus: практикум. М.: ГИТ, 2018. 248 с.

8. Журавлев А. А., Левин М. Г., Шор И. Я. Аналого-цифровое моделирование устройств энергетической электроники. URL: <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/analogo-cifrovoe-modelirovanie/> (дата обращения: 10.11.2024).
9. Максимов А. Н. Proteus VSM. Система виртуального моделирования схем. М.: Солон-пресс, 2016. 245 с.

REFERENCES

1. Mishura T. P., Aleksandrova S. A. Implementation of a portable digital frequency meter on the atmega 1284p microcontroller. Metrological support of innovative technologies: International forum (SPb., 4–5 April 2020). SPb.: SUAI; 2020, pp. 16–17. (In Russ.)
2. Surmilo A. A., Mishura T. P. Development of a digital phase shifter. III International competition of scientific research works (Ufa, 20 Nov. 2020). Ufa: Scientific research center bulletin of science. 2020, pp. 29–35. (In Russ.)
3. Sabunin A. E. Altium Designer. New solutions in the design of electronic devices. Available from: <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/altium-designer-novye-resheniya/> [Accessed 10 November 2024].
4. Kotovich V. V., Nazargulov I. R., Nemilostiv I. Yu. Educational software and hardware complex for designing digital measuring devices. Seventy-third International student scientific conference of GUAP: collection: report: P. 2: Technical sciences. SPb.: SUAI; 2020, pp. 202–206. (In Russ.)
5. Ryumik S. M. 1000 and one microcontroller circuit. Programmable systems. 2016;(3). (In Russ.). Available from: https://vk.com/wall-43363264_432520 [Accessed 15 November 2024].
6. Matyushin A. O. Microcontroller programming: strategy and tactics. Moscow: DMK Press; 2021. 358 p. (In Russ.)
7. Alekhin V. A. PIC microcontrollers: basics of programming and modeling in interactive environments MPLAB IDE, mikroC, TINA, Proteus: workshop. Moscow: GLT; 2018. 248 p. (In Russ.)
8. Zhuravlev A. A., Levin M. G., Shor I. Ya. Analog-digital modeling of power electronics devices. Available from: <https://www.elec.ru/library/nauchnaya-i-tehnicheskaya-literatura/analogo-cifrovoe-modelirovanie/> [Accessed 15 November 2024].
9. Maksimov A. N. Proteus VSM. System for virtual circuit simulation. Moscow: Solon-press; 2016. 245 p. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Мишура Тамара Прохоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – метрологическое обеспечение процессов производства, цифровая метрология.

Поступила в редакцию 18.12.2024

Поступила после рецензирования 23.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Mishura Tamara P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – metrological support of production processes, digital metrology.

Received 18.12.2024

Revised 23.12.2024

Accepted 21.01.2025

Методы расчета эффективности экранирования радиоэлектронной аппаратуры при эксплуатации в полевых условиях

Василий Анатольевич Штыркин¹

✉ shtyr62@mail.ru, SPIN-код: 9724-7990

¹ Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Сигнал», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Представлен оптимальный метод расчета эффективности экранирования радиоэлектронной аппаратуры при ее эксплуатации в полевых условиях и применении в технике специальной связи. Выполненные расчеты позволили получить наглядные результаты, применимые к разработке экранирующих решений для аппаратуры специального назначения. Это дает более реалистичное и практическое представление об экранирующей эффективности объектов, что особенно важно для разработки легких эффективных экранирующих материалов и решений.

Ключевые слова: эффективность экранирования, радиоэлектронная аппаратура, специальные аппаратные

Для цитирования: Штыркин В. А. Методы расчета эффективности экранирования радиоэлектронной аппаратуры при эксплуатации в полевых условиях // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 49–59. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-49-59.

Original article

Methods for calculating the effectiveness of REA shielding during field operation

Vasily A. Shtyrkin¹

✉ shtyr62@mail.ru, SPIN-code: 9724-7990

¹ Joint-Stock Company "Research and Production Enterprise "Signal", St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article presents an optimal method for calculating the shielding efficiency of electronic equipment during its operation in the field and application in special communication equipment. The calculations performed made it possible to obtain visual results applicable to the development of shielding solutions for special-purpose equipment. This provides a more realistic and practical view of the shielding efficiency of objects, and this is especially important for the development of lightweight, effective shielding materials and solutions.

Keywords: shielding efficiency, radio-electronic equipment, special hardware

For citation: Shtyrkin V. A. Methods for calculating the effectiveness of REA shielding during field operation. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2025;4(1):49–59. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-49-59.

Введение

Существует проблема применения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) общего назначения (персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ), серверы, маршрутизаторы, принтеры и т. п.) в специальном оборудовании, предназначенном для обеспечения работы личного состава в полевых условиях без учета эффективности экранирования РЭА.

При разработке специального оборудования в большей степени уделяется внимание тактико-техническим характеристикам аппаратной и эффективной защиты личного состава и применяемой им РЭА стрелковым оружием и осколками. При этом в своих докладах разработчики специальных аппаратных (СА) обращают внимание на

тот фактор, что малая эффективность экранирования (ЭЭ)¹ РЭА является демаскирующим признаком аппаратной [1].

Также слабая экранирующая эффективность остается актуальной проблемой для аппаратуры специальной связи, требующей создания вокруг себя контролирующей зоны, при этом экранирование достигается массивными корпусами или использованием генераторов шума [2].

¹ В современных исследованиях экранирующая эффективность часто обозначается как «Shielding effectiveness» (SE) и определяется через параметры затухания электромагнитного поля (дБ) за экранирующей поверхностью. Официально принятые стандарты, такие как IEEE STD 299 и MIL-STD-285, являются основой для измерений SE.

Научные работы V. Gaoui и D. Nan акцентируют внимание на новых методах повышения экранирующей эффективности с использованием многослойных структур, в частности, полимерных композитов, которые обеспечивают более легкие и устойчивые к внешним воздействиям экраны [3]. Однако создание простой и доступной методологии для анализа экранирующих характеристик таких материалов по-прежнему остается проблемой, не решенной на практике [4].

Задачами исследования являются рассмотрение и оптимизация методов расчета дифракции электромагнитных волн на импедансных клиновидных структурах, что может существенно повысить эффективность экранирования и улучшить параметры РЭА в условиях полевой эксплуатации. В рамках данной задачи планируется определить оптимальные методы расчета, подходящие для импедансных клиньев, которые могут быть использованы в разработке экранирующих решений для аппаратуры специального назначения.

Цели исследования – разработка и оптимизация методов для повышения ЭЭ радиоэлектронной аппаратуры, применяемой в условиях высоких электромагнитных помех [5].

Исследование направлено на:

1) анализ существующих методов экранирования и их применения в конструкциях малых и крупных размеров;

2) изучение возможностей использования многослойных полимерных композитов для создания легких и эффективных экранирующих конструкций;

3) разработку и внедрение методов косвенного измерения ЭЭ для компактных экранирующих конструкций, что позволяет избежать сложностей, связанных с внутренним размещением приемных антенн;

3) снижение временных и вычислительных затрат на этапе моделирования и проектирования экранирующих систем с применением доступных и высокоэффективных аналитических и численных методов.

Ожидается, что результаты работы позволят улучшить характеристики экранирующих материалов и конструкций для РЭА, повысив устойчивость аппаратуры к электромагнитным помехам и защиту от нежелательной утечки информации, улучшив ее эксплуатационные характеристики.

Решение задачи оптимизации методов расчета

Электромагнитное экранирование считается одним из основных способов защиты радиоэлек-

тронной аппаратуры от воздействия внешних электромагнитных помех (ЭМП), способных нарушить ее работоспособность. Ключевым показателем является ЭЭ, которая зависит от ряда факторов: типа материалов, геометрической формы экрана, его апертуры, а также заполнения проводящими и радиопоглощающими структурами [6]. Основным показателем качества электромагнитного экрана, характеризующим его способность снижать уровень воздействующей помехи, является ЭЭ, которая зависит от множества факторов – материала экрана, формы и геометрических размеров экрана и его апертур, заполнения экрана структурами из проводников, диэлектриков, радиопоглощающего материала и т. д. Как правило, проектирование электромагнитного экрана РЭА сводится к поиску его оптимальной конструкции, при которой в заданном частотном диапазоне достигается наилучшая ЭЭ [7]. Этот процесс требует многократной оценки ЭЭ, что вызывает рост временных и вычислительных затрат на проектирование электромагнитного экрана, а значит, и самой РЭА. Таким образом, для снижения затрат на проектирование РЭА актуально совершенствование методов и программ для моделирования экранирующих конструкций [8].

В задачах расчета ЭЭ для РЭА часто используется метод Зоммерфельда – Малюжинца¹, который доказал свою эффективность для вычислений в квазиоптическом диапазоне длин волн [9]. Этот метод позволяет представлять поле дифракции в виде контурного интеграла, что удобно для анализа в условиях сложной архитектуры объектов. Однако интегральные решения, полученные этим методом, обладают ограничениями с точки зрения практического применения и анализа дифракционного процесса [10].

На поздних этапах проектирования экранирующей конструкции РЭА обычно требуется проведение измерений ее ЭЭ [11]. Зачастую для этого используются две антенны (приемная и передающая), одна из которых размещается внутри экранирующей конструкции. Очевидно, что для экранирующих конструкций, имеющих небольшие габариты или внутреннее заполнение, проведение подобных измерений затруднительно [12]. Таким образом, актуальна разработка методов и устройств, позволяющих выполнить косвенные

¹ Метод Зоммерфельда – Малюжинца (Sommerfeld – Maluzhinets method, SMM) используют для моделирования дифракции на объектах с высокой степенью геометрической сложности. Часто метод рассматривается как часть подходов на основе Uniform Geometrical Theory of Diffraction (UTD), которая добавляет асимптотические методы для упрощения сложных геометрий.

измерения ЭЭ без необходимости внесения антенны внутрь экранирующей конструкции [13].

В последние годы металлы и их сплавы, традиционно используемые для изготовления экранирующих конструкций РЭА, заменяются на полимерные композитные экранирующие материалы¹, обладающие значительно меньшим весом, но менее высокой ЭЭ и недостаточной физической прочностью. Одним из возможных вариантов преодоления этих недостатков является создание многослойных электромагнитных экранов на основе различных сочетаний полимерных композитов. Такие конструкции исследовали В. Gaoui, D. Nan, M. Tahar, В. Н. Горшнев, В. И. Суляев и др., однако простые аналитические методы для оценки ЭЭ многослойных полимерных экранов, пригодные для использования разработчиками РЭА, пока не разработаны [14]. Создание доступных и простых методологий для анализа экранирующих характеристик многослойных композитов остается проблемой, на которую обращают внимание исследователи, включая V. Gaoui и D. Nan.

Моделирование экранирующих конструкций РЭА обычно выполняется в коммерческом программном обеспечении (ПО) на основе численных методов [15]. При этом из-за высокой стоимости такое ПО недоступно широкому кругу разработчиков РЭА [16]. Большая часть бесплатного ПО основана на аналитических методах и предназначена только для моделирования экранирующих материалов. Несмотря на значительный вклад разработчиков ПО L. Sevgi, G. Zhang, Ю. Н. Кофанова, А. С. Шалумова и др., универсальное ПО для моделирования экранирующих конструкций на основе аналитических методов разработано не было [16, 17].

В большинстве опубликованных исследований традиционные методы измерений по стандартам IEEE STD 299 и MIL-STD-285 применяются для определения ЭЭ средне- и крупногабаритных электромагнитных экранов, не имеющих внутреннего заполнения [18]. Для экранирующих конструкций, имеющих небольшие геометрические размеры или заполнение, могут быть применены методы косвенного измерения² ЭЭ из работ

¹ Терминология для материалов, используемых в экранировании, включает в себя «Multilayer Polymer Composites» (MPC) и «Electromagnetic Interference (EMI) Shielding». В современных публикациях обсуждаются такие аспекты, как оптимизация состава и геометрии слоев, которые улучшают механическую и экранирующую эффективность материалов.

² Термин «Indirect SE Measurement Methods» применяется для методов, при которых измерение SE осуществляется без размещения приемных антенн внутри экранирующей конструкции. В частности, используются модели с экстраполяцией данных для расчета экранирующего эффекта через внешние измерения поля.

J. В. Hwang, M. Joodaki, M. Kuhn, A. Shourvarzi, Д. МакНамара и др., не требующие размещения рецептора электромагнитного излучения внутри экранирующей конструкции. Однако устройство и оснастка для проведения подобных измерений также еще не разработаны [19, 21].

При исследовании процессов дифракции электромагнитных волн на реальных объектах необходимо представить каждому из них адекватную электродинамическую модель. При этом различные части поверхности объекта должны быть аппроксимированы поверхностями, имеющими такие геометрические формы и радиофизические свойства, для которых известны аналитические решения соответствующих модельных задач дифракции волн различных типов и поляризации [10, 20–22]. Гладкие участки корпуса целесообразно аппроксимировать идеально проводящими, импедансными или диэлектрическими каноническими поверхностями (плоскими или цилиндрическими, коническими или сферическими, параболическими и т. д.) [10, 22–24]. Места соединения гладких канонических поверхностей, представляющие собой прямолинейные и криволинейные угловые образования, а также острые кромки и ребра, аппроксимируются идеально проводящими, импедансными или диэлектрическими клиновидными образованиями с соответствующими углами раствора [10, 20, 22, 24].

В случае больших, по сравнению с длиной падающей волны, линейных размеров объекта поле, рассеянное его поверхностью в окружающее пространство, ищется в точке наблюдения в виде суперпозиции электромагнитных полей, рассеянных отдельными частями поверхности.

Таким образом, разработка методов расчета электромагнитных полей дифракции на импедансных и диэлектрических клиновидных образованиях является весьма актуальной задачей.

Исследования дифракции электромагнитных волн на импедансных клиновидных структурах имеют важное прикладное значение для расчета электромагнитных полей (ЭПМ), возбуждаемых объектами сложной архитектуры с различными электрическими характеристиками на их поверхности [10, 20, 22, 24]. Главной электродинамической моделью, лежащей в основе данной задачи, является дифракция плоской и цилиндрической электромагнитных волн на импедансном клине с полубесконечными гранями [9]. В основе большинства из них лежит метод Зоммерфельда – Малюжинца, который оказался самым эффективным при решении задач данного класса в квазиоптическом диапазоне длин волн. Основой метода является представление определяемого поля дифракции в виде контур-

ного интеграла Зоммерфельда. Однако решения, полученные в интегральной форме, не применимы для задач прикладной электродинамики как с вычислительной точки зрения, так и с точки зрения анализа процесса дифракции, поскольку не обладают физической наглядностью. Поэтому практический интерес представляет построение на основании точного решения, а именно – асимптотического решения дифракционной задачи, имеющего наглядную геометрическую и физическую интерпретации.

Задача по оптимизации информационных электромагнитных полей является актуальной и перспективной в современной электронике [22, 25]. Решение данной задачи ведет к сокращению времени расчета ЭМ поля, формируемого корпусными элементами, по сравнению с разностными методами и классическим методом связанных форм.

Возможные применения:

1) синтез направленных приемных и передающих антенн;

2) способы уменьшения заметности в радиодиапазоне (стелс-технологии);

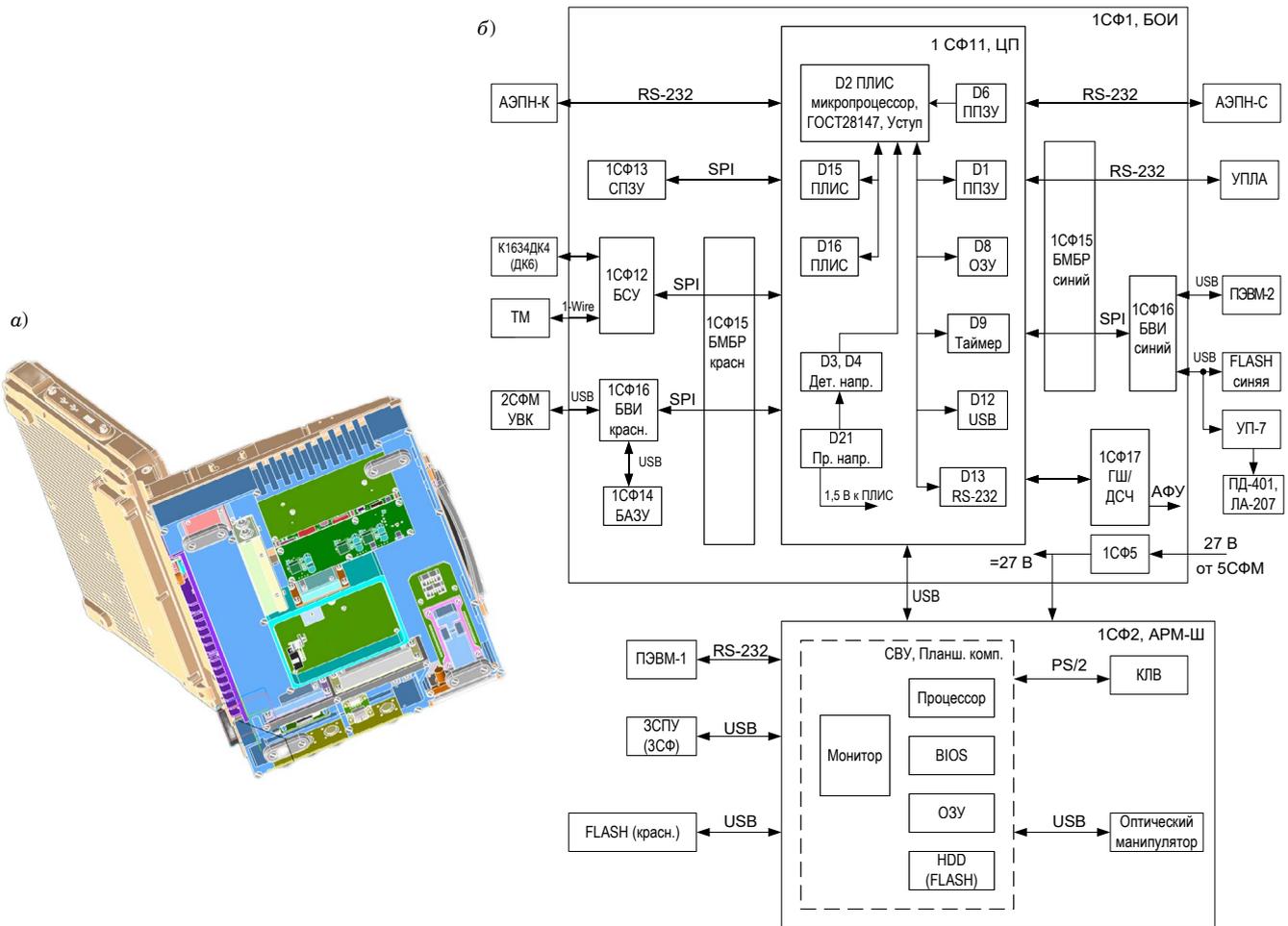
3) приемы по снижению излучаемых электрическими устройствами помех;

4) методы предотвращения нежелательной утечки информации через технические каналы.

На примере конкретного «изделия» (рис. 1, а) рассмотрим пути решения задачи оптимизации. Структурная схема «изделия» показана на рис. 1, б.

В данном исследовании акцент сделан на использовании метода Зоммерфельда – Малюжинца для расчета электромагнитных полей, рассеянных сложными объектами. Этот метод, ориентированный на задачи дифракции и экранирования, обеспечивает баланс между точностью и вычислительной эффективностью и широко применяется для моделирования и анализа электромагнитного поведения в условиях, когда размеры объектов значительно превышают длину волны.

Метод Зоммерфельда – Малюжинца зарекомендовал себя как один из самых эффективных



• Рис. 1. Модель «изделия» (а); структурная схема «изделия» (а)
 • Fig. 1. “Product” model (a); structural diagram of “article” (б)

в задачах дифракции и экранирования, особенно для объектов с клиновыми и угловыми образованиями. Данный метод дает возможность представлять дифракционные поля в виде контурных интегралов, что делает возможным более наглядное и физически интерпретируемое представление. Применение этого метода позволяет детально анализировать поведение электромагнитных волн на импедансных поверхностях, что важно для оптимизации экранирующих характеристик сложных конструкций.

Для упрощения задач дифракции гладкие участки объектов и места соединения канонических поверхностей аппроксимируются идеальными и импедансными клиновидными образованиями. Такой подход, в сочетании с методом Зоммерфельда – Малюжинца, позволяет получить точные решения для участков, где традиционные численные методы требуют больших вычислительных ресурсов. Включение угловых образований и кромок в расчет помогает эффективно моделировать электромагнитные поля, рассеянные реальными объектами сложной формы.

В задачах проектирования экранирующих конструкций малых размеров или конструкций с внутренним заполнением метод Зоммерфельда – Малюжинца дает теоретическую основу для развития методов косвенного измерения ЭЭ. Эти методы позволяют избежать трудностей, связанных с размещением приемных антенн внутри экранирующих конструкций, и предоставляют точные данные, учитывающие особенности сложных геометрий.

Многослойные композитные материалы обеспечивают легкость и устойчивость экранирующих конструкций, что особенно важно для устройств с малой массой. Метод Зоммерфельда – Малюжинца, применяемый для анализа дифракции на многослойных структурах, позволяет оптимально рассчитывать экранирующую эффективность в таких сложных материалах. Использование этого метода для многослойных структур помогает находить оптимальные сочетания слоев для повышения устойчивости и эффективности экранирования.

Программные пакеты для численного анализа, включающие в себя реализацию метода Зоммерфельда – Малюжинца, позволяют проводить точные расчеты ЭЭ и других электродинамических параметров. Применение этого метода в численных моделях, таких как метод конечных элементов и метод конечных разностей, дает возможность оптимизировать экранирующие конструкции, снижая затраты на проектирование и повышая точность моделирования.

Применение метода Зоммерфельда – Малюжинца обеспечивает детальный анализ электромагнитных полей для сложных экранирующих конструкций, повышает точность расчетов и позволяет создавать экранирующие решения, оптимально сочетающие легкость и устойчивость к электромагнитным помехам.

Рассеяние на диэлектрических и импедансных клиновидных образованиях

Проведем исследование электромагнитных полей, рассеиваемых на неоднородностях, имеющих форму клина с различными диэлектрическими и импедансными свойствами. Такие неоднородности могут возникать, например, при взаимодействии электромагнитных волн с поверхностью диэлектрических или импедансных структур.

Для описания рассеяния электромагнитных волн на клиновидных образованиях используются методы теории дифракции и математические модели, основанные на уравнениях Максвелла. В результате исследований были получены формулы для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн через клиновидные образования с учетом их диэлектрических и импедансных свойств.

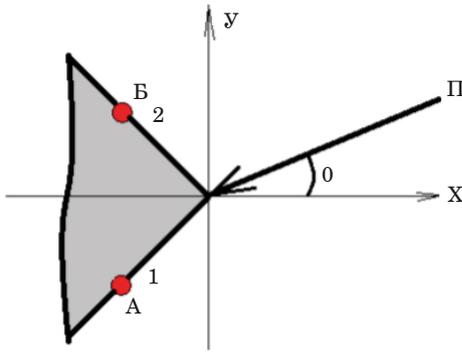
Применение полученных результатов позволяет оптимизировать характеристики антенн, линий передачи и других устройств, работающих с электромагнитными полями, а также прогнозировать характеристики рассеяния радиоволн в различных условиях.

Поляризационные эффекты при рассеянии электромагнитных волн

Поляризационные эффекты при рассеянии электромагнитных волн связаны с изменением состояния поляризации электромагнитной волны при взаимодействии с различными объектами и поверхностями. Эти эффекты возникают из-за различия в свойствах поверхностей, таких как диэлектрическая проницаемость, проводимость и магнитная восприимчивость.

Один из основных поляризационных эффектов – это дихроизм, который проявляется в различии коэффициентов поглощения и отражения для волн с разными состояниями поляризации. Это явление используется в поляризационных фильтрах и оптических сенсорах.

Другой важный эффект – круговой дихроизм, который возникает при взаимодействии света с молекулами, имеющими асимметричное строение. Этот эффект приводит к появлению разности коэффициентов поглощения для правого и левополяризованных светов.



• *Рис. 2. Поперечное сечение клина*
 • *Fig. 2. Wedge cross section*

Поляризационные эффекты также играют важную роль в изучении структуры и свойств материалов, таких как кристаллы, белки и биологические мембраны. Они позволяют получать информацию о структуре и динамике молекул, а также о взаимодействии между ними.

Суть метода Зоммерфельда – Малюжинца

Рассмотрим дифракцию плоской гармонической волны на прямоугольном диэлектрическом клине (рис. 2) для случая нормального падения волны на ребро клина в форме:

$$u_{E,H}^n(r, \phi) = \exp(ikr \cos(\phi - \phi_0))$$

в полярных координатах (r, ϕ) , распространяющуюся из верхнего полупространства при $0 \leq \phi_0 < \pi$. Предполагаем зависимость от времени вида $\exp(i\omega t)$, где ω – круговая частота; t – время.

Решение уравнения Гельмгольца $\Delta u_{E,H} + 2ku_{E,H} = 0$ было использовано Зоммерфельдом для решения задачи рассеяния плоской волны идеально проводящей полуплоскостью в следующем виде:

$$u_{E,H}^n(r, \phi) = \frac{i}{2\pi} \int_{\gamma} \exp(ikr \cos(\alpha)) S_{E,H}(\alpha + \phi) d\alpha,$$

где γ – контур интегрирования в комплексной плоскости α ; $S_{E,H}$ – амплитуды парциальных плоских волн.

Решение задачи дифракции на клине с импедансными краевыми условиями (задача Малюжинца)

Окончательно решение задачи Малюжинца имеет вид:

$$u(kr, \phi) = \frac{c}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{\Psi(z + \phi, \theta_+) \Psi(2 + \phi - 2\Phi, \theta_-) \mu \cos \mu \phi_0}{\sin \mu(z + \phi) - \sin \mu \phi_0} \times e^{-ikr \cos z} dz.$$

Методом Зоммерфельда – Малюжинца рассчитывались следующие величины:

- 1) распределение амплитуд и фаз поверхностных токов по контуру поперечного сечения клина;
- 2) распределение амплитуд и фаз неравномерных частей поверхностных токов по контуру поперечного сечения клина;
- 3) распределение модуля и фазы поверхностного импеданса по контуру поперечного сечения клина;
- 4) зависимости амплитуды и фазы дифракционного поля в дальней зоне от угла наблюдения в плоскости, перпендикулярной ребру клина.

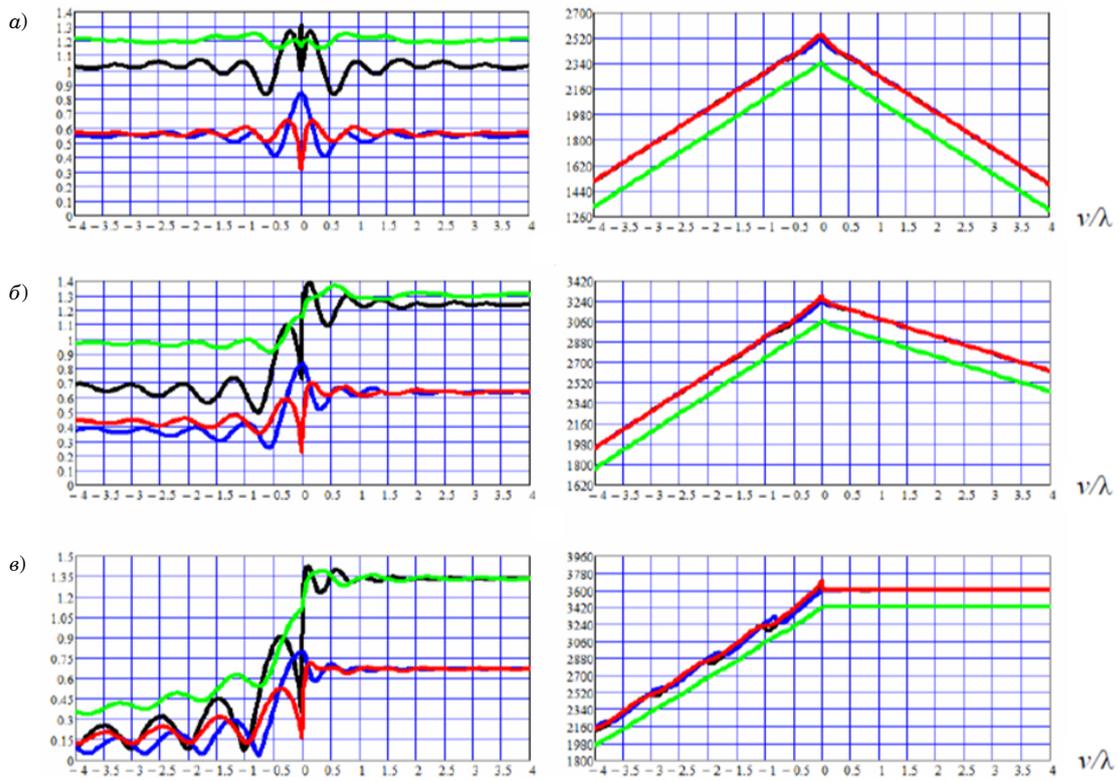
Диапазон углов облучения клина плоской волной α , отсчитываемый от плоскости симметрии клина, менялся в пределах $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$, при этом плоские волны, проникшие внутрь клина, в нем не переотражаются.

Пример расчета дифракции плоской гармонической волны на прямоугольном диэлектрическом клине для случая нормального падения волны на ребро клина

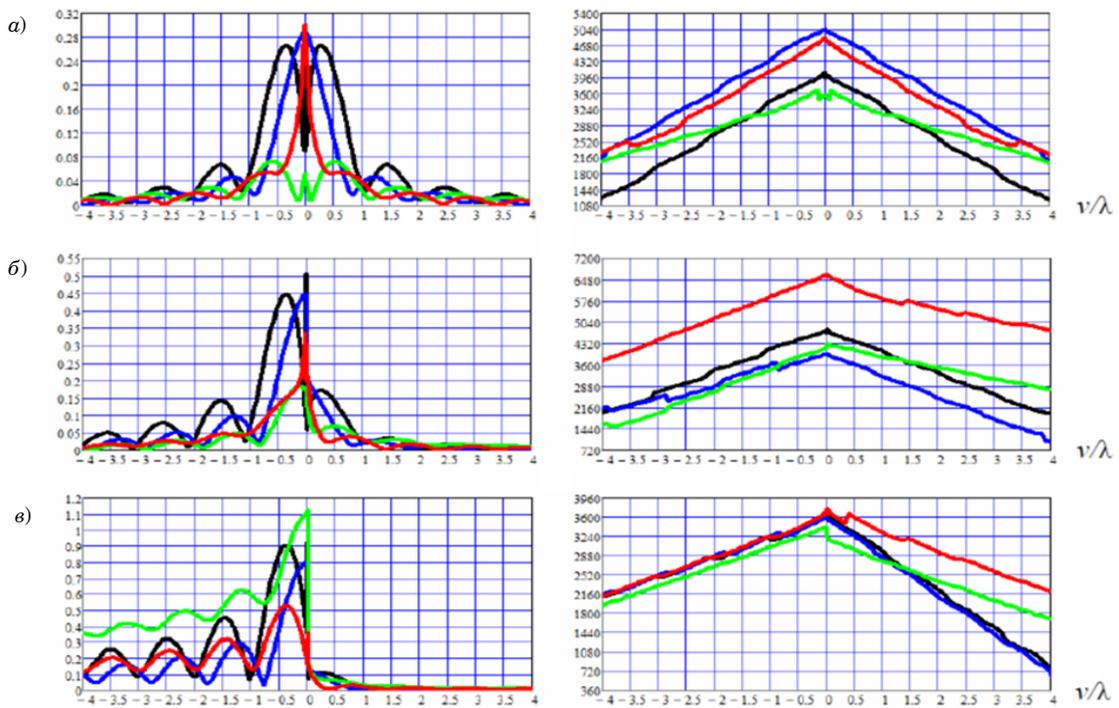
Расчеты проводились для E -поляризации (вектор электрического поля параллелен ребру клина) и H -поляризации (вектор магнитного поля параллелен ребру клина) падающего поля методом комплексных амплитуд. Ребро клина при численном решении сглаживалось окружностью малого радиуса ($r = 0,0159\lambda$). Диэлектрическая проницаемость была принята равной $\epsilon = 4 - 0,12i$, что в диапазоне длин волн $0,3 \div 3$ м хорошо описывает свойства бетона.

Исходные данные:

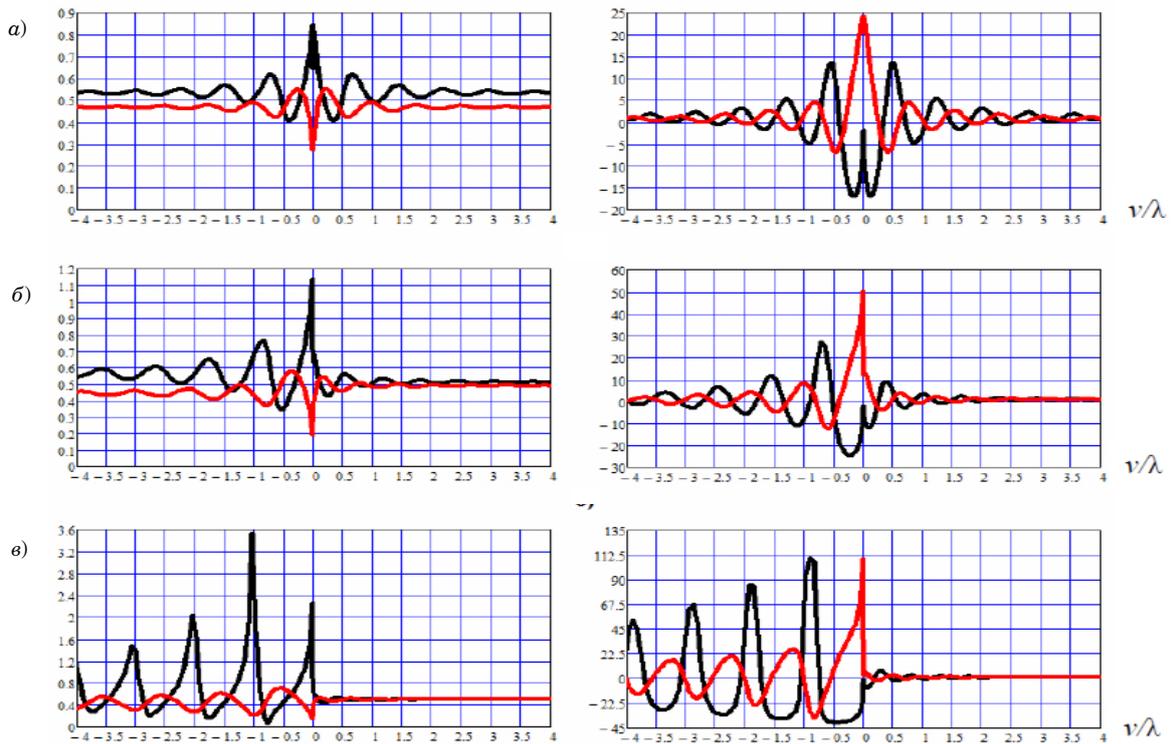
- 1) длина плоской или цилиндрической волны: $\lambda = 0,5$ м; 1 м;
- 2) электрическая постоянная: $\epsilon_0 = 8,85418781281313 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;
- 3) магнитная постоянная: $\mu_0 = 1,25663706212192 \cdot 10^{-6}$ Гн/м;
- 4) диэлектрическая проницаемость среды (воздуха): $\epsilon_1^- = 1,00058986$;
- 5) диэлектрическая проницаемость среды (бетона): $\epsilon_2^- = 4 - 0,12i$;
- 6) магнитная проницаемость среды (воздуха): $\mu_1^- = 1,00000037$;
- 7) магнитная проницаемость среды (бетона): $\mu_2^- = 1$;
- 8) угол облучения волной: $\alpha = 0^\circ; 20^\circ; 45^\circ$ (рис. 3–6).



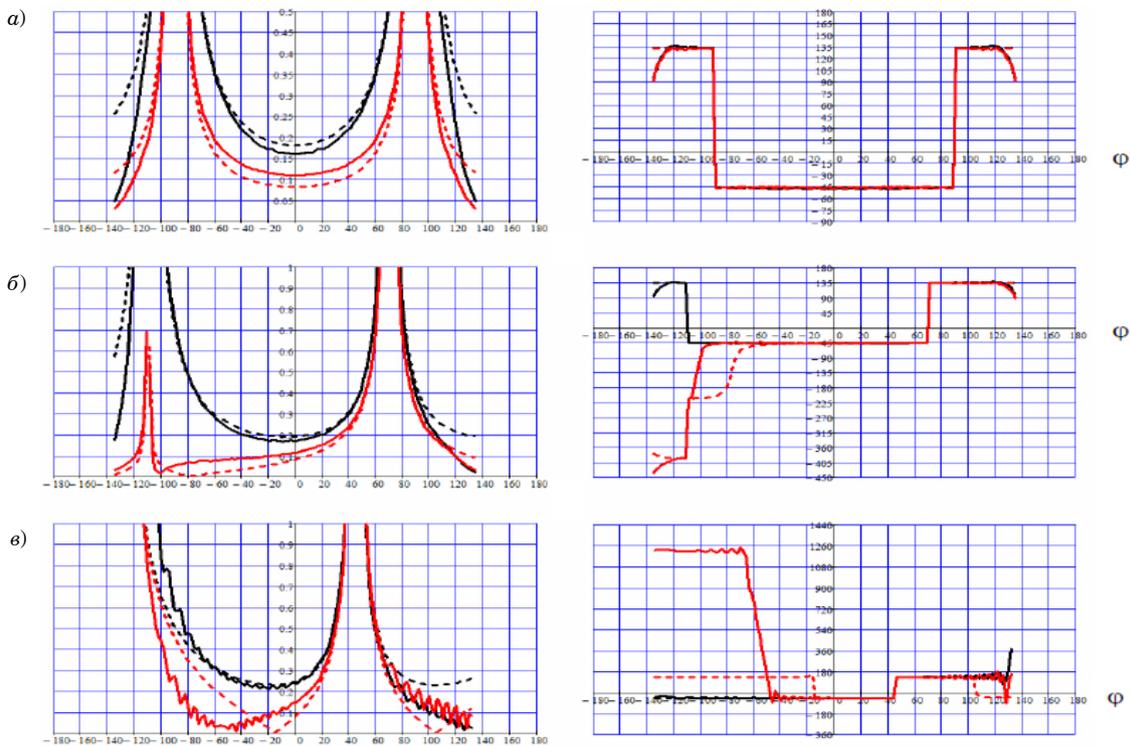
• *Рис. 3. Амплитуды и фазы поверхностных токов: а – угол облучения $\alpha = 0^\circ$; б – угол облучения $\alpha = 20^\circ$; в – угол облучения $\alpha = 45^\circ$*
 • *Fig. 3. Surface current amplitudes and phases: а – irradiation angle $\alpha = 0^\circ$; б – irradiation angle $\alpha = 20^\circ$; в – irradiation angle $\alpha = 45^\circ$*



• *Рис. 4. Амплитуды и фазы неравномерных частей токов: а – угол облучения $\alpha = 0^\circ$; б – угол облучения $\alpha = 20^\circ$; в – угол облучения $\alpha = 45^\circ$*
 • *Fig. 4. Amplitudes and phases of non-uniform parts of currents: а – irradiation angle $\alpha = 0^\circ$; б – irradiation angle $\alpha = 20^\circ$; в – irradiation angle $\alpha = 45^\circ$*



• *Рис. 5. Модули и фазы поверхностных импедансов: а – угол облучения $\alpha = 0^\circ$; б – угол облучения $\alpha = 20^\circ$; в – угол облучения $\alpha = 45^\circ$*
 • *Fig. 5. Surface impedance moduli and phases: а – irradiation angle $\alpha = 0^\circ$; б – irradiation angle $\alpha = 20^\circ$; в – irradiation angle $\alpha = 45^\circ$*



• *Рис. 6. Амплитуды и фазы рассеянных клином полей как функции угла наблюдения: а – угол облучения $\alpha = 0^\circ$; б – угол облучения $\alpha = 20^\circ$; в – угол облучения $\alpha = 45^\circ$*
 • *Fig. 6. Amplitudes and phases of wedge-scattered fields as a function of viewing angle: а – irradiation angle $\alpha = 0^\circ$; б – irradiation angle $\alpha = 20^\circ$; в – irradiation angle $\alpha = 45^\circ$*

Обсуждение результатов

Применение метода Зоммерфельда – Малюжинца для анализа экранирующих характеристик многослойных структур продемонстрировало его высокую эффективность при моделировании сложных объектов с импедансными и диэлектрическими границами. Использование контурных интегралов позволило получить наглядные результаты, применимые к разработке экранирующих решений для аппаратуры специального назначения. Однако для реальных объектов, где присутствуют множественные переотражения, методика нуждается в доработке для учета более сложных условий распространения электромагнитных волн. Это станет возможным при дальнейшем расширении модели с учетом дополнительных источников поля.

Заключение

Проведенное исследование показало, что метод Зоммерфельда – Малюжинца дает высокую точность при расчете экранирующей эффективности объектов с угловыми структурами. Созданная методология, оптимизированная под анализ сложных импедансных поверхностей, открывает новые возможности для проектирования легких и устойчивых к помехам экранирующих материалов.

Современные методы, такие как SMM, UTD и численные методы на основе конечных элемен-

тов, значительно повысили точность и скорость расчетных моделей по сравнению с традиционными методами. Ранее использовавшиеся методы моментов и пространственных потоков часто требовали сложных и ресурсоемких вычислений, особенно для объектов с большим количеством отражений и сложной геометрией. Новые подходы, такие как комбинирование SMM с UTD, позволили [26]:

1) увеличить вычислительную эффективность за счет асимптотического представления дифракции через контурные интегралы, что уменьшает количество необходимых вычислительных ресурсов;

2) упростить модельные расчеты для многослойных структур, что позволяет быстрее и точнее предсказать их поведение в диапазоне различных частот;

3) поддерживать гибкость и адаптивность моделей, что позволяет проводить расчеты для широкого спектра материалов и конструкций.

Эти методы дают более реалистичное и практическое представление об экранирующей эффективности объектов, что особенно важно для разработки легких и эффективных экранирующих материалов. В развитии решения поставленной задачи планируется интеграция асимптотических методов расчета с современными возможностями нейросетей и генетических алгоритмов для автоматизации проектирования экранирующих конструкций в реальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горшнев В. Н., Суслев В. И. Электромагнитное экранирование на основе многослойных композитов: свойства и применение // *Современные проблемы науки и технологий*. 2020. Т. 28, № 2. С. 45–51.
2. Limitations of noise generators and thick enclosures for effective electromagnetic shielding / A. Shourvarzi [et al.] // *Journal of applied electromagnetics*. 2021. Vol. 36, № 2. P. 212–220.
3. Gaoui V., Han D. Multilayer polymer composites for electromagnetic shielding applications // *Journal of materials science and engineering*. 2019. Vol. 45, № 5. P. 789–798.
4. Sharma R., Singh A. K. Current limitations in practical EMI shielding analysis of advanced composites // *Materials science forum*. 2021. Vol. 1035. P. 192–198.
5. Kim S., Park J. Numerical simulation software in the design of electromagnetic shielding for electronic devices // *Electromagnetic compatibility journal*. 2021. Vol. 48, № 5. P. 415–422.
6. Shourvarzi A., Hwang J. B. Practical approaches to electromagnetic shielding for critical electronic components // *Journal of applied electromagnetics*. 2020. Vol. 37, № 4. P. 401–409.
7. Kovac M., Jirinec M. Optimization of electromagnetic shielding enclosures: influence of material, geometry, and aperture size // *Journal of electromagnetic waves and applications*. 2017. Vol. 31, № 9. P. 1050–1060.
8. Vasquez R., Smith J. Optimization of electromagnetic shielding using computational models to reduce design time // *Computational electromagnetics journal*. 2020. Vol. 55, № 7. P. 399–409.
9. Теория рассеяния электромагнитных волн в угловых структурах / А. Ф. Крячко [и др.]. СПб.: Наука, 2009. С. 63–70.
10. Сеньор Т. Б. А., Волакис Дж. Л. Приближенные краевые условия в электродинамике. М.: Мир, 1981.

11. Howard J., McGee T. Advanced measurement techniques for assessing shielding performance in electronic device enclosures // *Electromagnetic shielding technology*. 2020. Vol. 44, № 1. P. 215–223.
12. Ramahi O. M., Yu H. Challenges and solutions for shielding effectiveness testing in small electronic enclosures // *Electromagnetic compatibility journal*. 2019. Vol. 44, № 5. P. 201–210.
13. Kuhn M., Smith P. R. Alternative shielding effectiveness measurement techniques for small enclosures with internal structures // *IEEE electromagnetic compatibility magazine*. 2020. Vol. 9, № 2. P. 43–51.
14. Shin D. K., Choi M. W. Challenges and prospects of polymer-based composite materials in EMI shielding // *Journal of electromagnetic waves and applications*. 2022. Vol. 36, № 5. P. 490–501.
15. Shen C., Lee T. Cost implications of using high-end electromagnetic simulation software for shielding applications // *Journal of applied electromagnetics*. 2021. Vol. 38, № 3. P. 357–366.
16. Shalumov A. S., Kofanov Y. N. Freeware and open-source software for analytical electromagnetic shielding simulations // *Electromagnetic compatibility journal*. 2020. Vol. 50, № 4. P. 327–336.
17. Lee H., Sevgi L. Challenges in developing universal freeware for electromagnetic shielding simulations // *Journal of applied electromagnetics*. 2021. Vol. 41, № 2. P. 213–222.
18. Robinson T., McDonald J. Assessment of electromagnetic shielding performance using IEEE and MIL standards // *Progress in electromagnetics research*. 2018. Vol. 62. P. 319–330.
19. Shourvarzi A., McFarland J. Assessing shielding performance of small enclosures with indirect methods // *Progress in electromagnetics research*. 2020. Vol. 92. P. 401–412.
20. Уфимцев П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции // *Доклады Академии наук СССР*. 1957. Т. 6, № 7. С. 255–258.
21. МакНамара Д. А., Пусторус С. В. И. Введение в унифицированную геометрическую теорию дифракции. М.: Техносфера, 2007.
22. Боровиков В. А., Кинбер Б. Я. Геометрическая теория дифракции и асимптотические методы в распространении электромагнитных волн. М.: Физматлит, 1994.
23. Уфимцев П. Я. Основы физической теории дифракции. М.: Физматлит, 2011.
24. Нотт Э. Ф., Шаффер Дж. Ф. Эффективная поверхность рассеяния. М.: Радио и связь, 1987.
25. Breuer M., Sornette D. Asymptotic Methods in electromagnetic wave propagation and their practical applications // *IEEE transactions on antennas and propagation*. 2010. Vol. 58, № 5. P. 1352–1361.
26. Shin D. K., Choi M. W. Challenges and prospects of polymer-based composite materials in EMI shielding // *Journal of electromagnetic waves and applications*. 2022. Vol. 36, № 5. P. 490–501.

REFERENCES

1. Gorshnev V. N., Suslyayev V. I. Electromagnetic shielding based on multilayer composites: properties and applications. *Modern problems of science and technology*. 2020;28(2):45–51. (In Russ.).
2. Shourvarzi A. et al. Limitations of noise generators and thick enclosures for effective electromagnetic shielding. *Journal of applied electromagnetics*. 2021;36(2):212–220.
3. Gaoui V., Han D. Multilayer polymer composites for electromagnetic shielding applications. *Journal of materials science and engineering*. 2019;45(5):789–798.
4. Sharma R., Singh A. K. Current limitations in practical EMI shielding analysis of advanced composites. *Materials science forum*. 2021;1035:192–198.
5. Kim S., Park J. Numerical simulation software in the design of electromagnetic shielding for electronic devices. *Electromagnetic compatibility journal*. 2021;48(5):415–422.
6. Shourvarzi A., Hwang J. B. Practical approaches to electromagnetic shielding for critical electronic components. *Journal of applied electromagnetics*. 2020;37(4):401–409.
7. Kovac M., Jirinec M. Optimization of electromagnetic shielding enclosures: influence of material, geometry, and aperture size. *Journal of electromagnetic waves and applications*. 2017;31(9):1050–1060.
8. Vasquez R., Smith J. Optimization of electromagnetic shielding using computational models to reduce design time. *Computational electromagnetics journal*. 2020;55(7):399–409.
9. Kryachko A. F., Likhachev V. M. et al. Theory of electromagnetic wave scattering in angular structures. SPb.: Nauka; 2009, pp. 63–70. (In Russ.).
10. Senior T. B. A., Volakis J. L. Approximate boundary conditions in electrodynamics. Moscow: Mir, 1981. (In Russ.).
11. Howard J., McGee T. Advanced measurement techniques for assessing shielding performance in electronic device enclosures. *Electromagnetic shielding technology*. 2020;44(1):215–223.

12. Ramahi O. M., Yu H. Challenges and solutions for shielding effectiveness testing in small electronic enclosures. *Electromagnetic compatibility journal*. 2019;44(5):201–210.
13. Kuhn M., Smith P. R. Alternative shielding effectiveness measurement techniques for small enclosures with internal structures. *IEEE electromagnetic compatibility magazine*. 2020;9(2):43–51.
14. Shin D. K., Choi M. W. Challenges and prospects of polymer-based composite materials in EMI shielding. *Journal of electromagnetic waves and applications*. 2022;36(5):490–501.
15. Shen C., Lee T. Cost implications of using high-end electromagnetic simulation software for shielding applications. *Journal of applied electromagnetics*. 2021;38(3):357–366.
16. Shalumov A. S., Kofanov Y. N. Freeware and open-source software for analytical electromagnetic shielding simulations. *Electromagnetic compatibility journal*. 2020;50(4):327–336.
17. Lee H., Sevgi L. Challenges in developing universal freeware for electromagnetic shielding simulations. *Journal of applied electromagnetics*. 2021;41(2):213–222.
18. Robinson T., McDonald J. Assessment of electromagnetic shielding performance using IEEE and MIL standards. *Progress in electromagnetics research*. 2018;62:319–330.
19. Shourvarzi A., McFarland J. Assessing shielding performance of small enclosures with indirect methods. *Progress in electromagnetics research*. 2020;92:401–412.
20. Ufimtsev P. Yu. Boundary wave method in the physical theory of diffraction. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1957; 6(7):255–258. (In Russ.).
21. McNamara D. A., Pistorius S. V. I. Introduction to unified geometric diffraction theory. Moscow: Technosphere; 2007. (In Russ.).
22. Borovikov V. A., Kinber B. Yu. Geometric diffraction theory and asymptotic methods in the propagation of electromagnetic waves. Moscow: Fizmatlit; 1994. (In Russ.).
23. Ufimtsev P. Yu. Fundamentals of the physical theory of diffraction. Moscow: Fizmatlit; 2011. (In Russ.).
24. Knott E. F., Shaffer J. F. Effective scattering surface. Moscow: Radio i svyaz; 1987. (In Russ.).
25. Breuer M., Sornette D. Asymptotic Methods in electromagnetic wave propagation and their practical applications. *IEEE transactions on antennas and propagation*. 2010;58(5):1352–1361.
26. Shin D. K., Choi M. W. Challenges and prospects of polymer-based composite materials in EMI shielding. *Journal of electromagnetic waves and applications*. 2022;36(5):490–501.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Штыркин Василий Анатольевич, начальник научно-исследовательского отделения АО «НПП «Сигнал».

Область научных интересов – безопасность применения техники специальной связи.

Поступила в редакцию 20.12.2024

Поступила после рецензирования 25.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Shtyrkin Vasily A., Head at the Research Department, Research and Production Enterprise “Signal”.

Research interests – the safety of the use of special communication equipment.

Received 20.12.2024

Revised 25.12.2024

Accepted 21.01.2025

Научная статья
УДК 053.007

DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-60-67

Система временной синхронизации для изучения процессов в плазме переменного тока промышленной частоты методом оптической эмиссионной спектроскопии

Александр Андреевич Дьяченко¹

✉ dyachenko_180396@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-5473-8324, SPIN-код: 2814-0654, Author ID: 1093463

Михаил Эрнестович Пинчук¹

pinchme@mail.ru, orcid.org/0000-0002-1948-0329, SPIN-код: 1313-7645, Author ID: 125915

Александр Викторович Суров¹

avsuov@ieeras.ru, orcid.org/0000-0003-1107-3259, SPIN-код: 5812-7624, Author ID: 888547

Алексей Валерьевич Никонов¹

nikonav@mail.ru orcid.org/0000-0003-1471-2327, SPIN-код: 8215-1982, Author ID: 161871

Евгений Олегович Серб¹

eoserba@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4310-9754, SPIN-код: 9064-5806, Author ID: 597575

Геннадий Валерьевич Наконечный¹

ghennady@mail.ru, SPIN-код: 6708-9658, Author ID: 161870

Сергей Дмитриевич Попов¹

sergey_porov1973@mail.ru, SPIN-код: 2603-0935, Author ID: 34512

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Для исследования процессов в плазме, генерируемой устройствами с источниками питания переменного тока, требуется временная синхронизация процесса измерения параметров плазмы с его фазой. Для этого необходима схема создания синхронизирующих импульсов. В работе описаны разработка и эксплуатация данной схемы для исследования плазмы, создаваемой плазматроном промышленной частоты 50 Гц.

Ключевые слова: эмиссионная спектроскопия, автоматизация измерений, синхронизация измерений

Благодарности. Выражаем признательность заведующему лабораторией перспективных конструкций плазмодинамических и электродных систем Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук кандидату технических наук Владимиру Евгеньевичу Кузнецову, в рамках работы с которым происходила модернизация устройства.

Для цитирования: Дьяченко А. А., Пинчук М. Э., Суров А. В., Никонов А. В., Серб Е. О., Наконечный Г. В., Попов С. Д. Система временной синхронизации для изучения процессов в плазме переменного тока промышленной частоты методом оптической эмиссионной спектроскопии // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 60–67. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-60-67.

Original article

Time synchronization system for studying processes in industrial frequency alternating current plasma using optical emission spectroscopy

Alexander A. Dyachenko¹

✉ dyachenko_180396@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-5473-8324, SPIN-code: 2814-0654, Author ID: 1093463

Mikhail E. Pinchuk¹

pinchme@mail.ru, orcid.org/0000-0002-1948-0329, SPIN-code: 1313-7645, Author ID: 125915

Alexander V. Surov¹

avsuov@ieeras.ru, orcid.org/0000-0003-1107-3259, SPIN-code: 5812-7624, Author ID: 888547

Aleksey V. Nikonov¹

nikonav@mail.ru orcid.org/0000-0003-1471-2327, SPIN-code: 8215-1982, Author ID: 161871

Evgeny O. Serba¹

eoserba@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4310-9754, SPIN-code: 9064-5806, Author ID: 597575

Gennady V. Nakonechny¹

ghennady@mail.ru, SPIN-code: 6708-9658, Author ID: 161870

Sergey D. Popov¹

sergey_popov1973@mail.ru, SPIN-code: 2603-0935, Author ID: 34512

¹ Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. To study processes in plasma generated by devices with AC power sources, time synchronization of the plasma parameter measurement process with its phase is required. This requires a synchronizing pulse generation circuit. The paper describes the development and operation of this circuit for studying plasma generated by a 50 Hz industrial frequency plasma torch.

Keywords: emission spectroscopy, measurement automation, measurement synchronization

Acknowledgements. We express our gratitude to Vladimir E. Kuznetsov, Candidate of Technical Sciences, Head at the Laboratory of Advanced Designs of Plasmadynamic and Electrode Systems at the Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering of the Russian Academy of Sciences, who worked with us to modernize the device.

For citation: Dyachenko A. A., Pinchuk M. E., Surov A. V., Nikonov A. V., Serba E. O., Nakonechny G. V., Popov S. D. Time synchronization system for studying processes in industrial frequency alternating current plasma using optical emission spectroscopy. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):60–67. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-60-67.

Введение

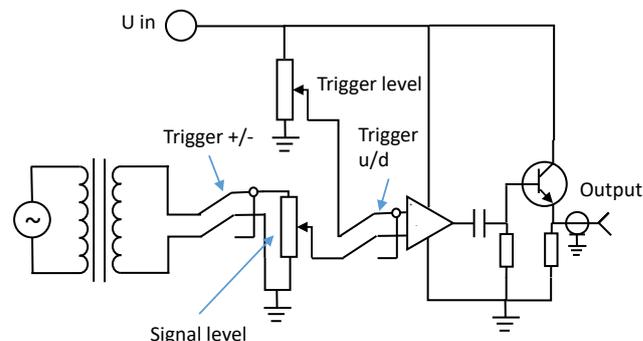
На сегодняшний день электродуговые плазмотроны делятся на два типа – постоянного тока и переменного. Первые генерируют плазму с более стабильными во времени параметрами, но требуют дорогостоящих выпрямителей для своей работы. Источники питания постоянного тока до 150 кВт дешевле, чем источники переменного тока аналогичной мощности. Однако при наращивании мощности имеет смысл применение плазмотронов переменного тока, которые сложнее в эксплуатации и требуют внимания к стабильности горения дуги, но обходятся дешевле. Для разработки и диагностики таких плазмотронов необходимы средства, учитывающие переменный характер измеряемых параметров. Одним из самых простых в реализации методов измерения параметров плазмы является оптическая эмиссионная спектроскопия.

При исследовании плазмы переменного тока промышленной частоты (например, промышленных плазмотронов 50 Гц) имеет смысл проводить спектральные измерения в точно определенной фазе сигнала. Характерные времена релаксации процессов в плазме намного короче периода колебаний промышленной частоты. Минимально возможная экспозиция для проводимых в рамках данной работы экспериментов составляет 1 мс для матрицы Andorr Istar и 0,8 мс для Andorr Newton. Для получения достаточной светосилы требуется накопление сигнала, а для записи спектров с временным разрешением выше 1 мс – система генерации импульсов, основанная на определенной фазе тока, протекающего через разрядный промежуток. Возможна синхронизация непосредственно с током дуги, но в данном случае форма тока раз-

ряда обычно несинусоидальна, а непериодические процессы, связанные, например, с эрозией электродов, могут вносить искажения в процесс синхронизации. Поэтому было решено в качестве синхронизирующего сигнала использовать напряжение питающей электросети. Так как чаще всего плазмотроны промышленной частоты питаются от сети без частотного преобразователя, разность фаз тока дуги с напряжением в розетке питающей сети экспериментального стенда постоянна. Исходя из этого, имеет смысл подключать синхронизирующую систему непосредственно к розетке. Далее будут описаны несколько вариантов синхронизирующей схемы.

Материал и методы исследования

Прототип. В первом варианте схемы (рис. 1) управление осуществлялось путем подстройки напряжения на входе компаратора под нужную фазу синусоидального сигнала частотой 50 Гц. Регулировка состояла из двух переключателей



• Рис. 1. Первый вариант схемы синхронизации
• Fig. 1. The first version of the synchronization scheme

полярности: первый, изменяя полярность вторичной обмотки понижающего трансформатора, сдвигал фазу синусоидального сигнала на 180° и смещал время срабатывания на 10 мс; второй, переключая инвертирующий и неинвертирующий входы системы синхронизации, сдвигал фазу срабатывания на 90° и создавал временной сдвиг на 5 мс. Более тонкая регулировка (в пределах 5 мс) осуществлялась с помощью потенциометров на каждом канале. Эта система позволяет регулировать синхронизацию в широком диапазоне, но процесс регулирования синхронизации только с ее помощью при проведении эксперимента оказался недостаточно удобным, требующим дополнительных затрат времени исследователя.

Использование для подстройки фазы системы из переключателей и двух потенциометров выявило следующие неудобства: система управления далеко не интуитивная, а при превышении опорным напряжением амплитуды сигнала перестает генерировать импульсы. Также затруднена синхронизация в районах максимумов входного сигнала, ввиду того, что производная напряжения по времени равна нулю. Впоследствии к этой схеме присоединили генератор задержки импульсов, что позволило несколько упростить процесс измерений. Так как схема питалась от лабораторного источника питания и использовала отдельную схему задержки импульсов, то сборка занимала много места и была неудобна в обращении. В дальнейшем вся схема была спроектирована заново, с учетом опыта использования прототипа. Также были добавлены новые функции.

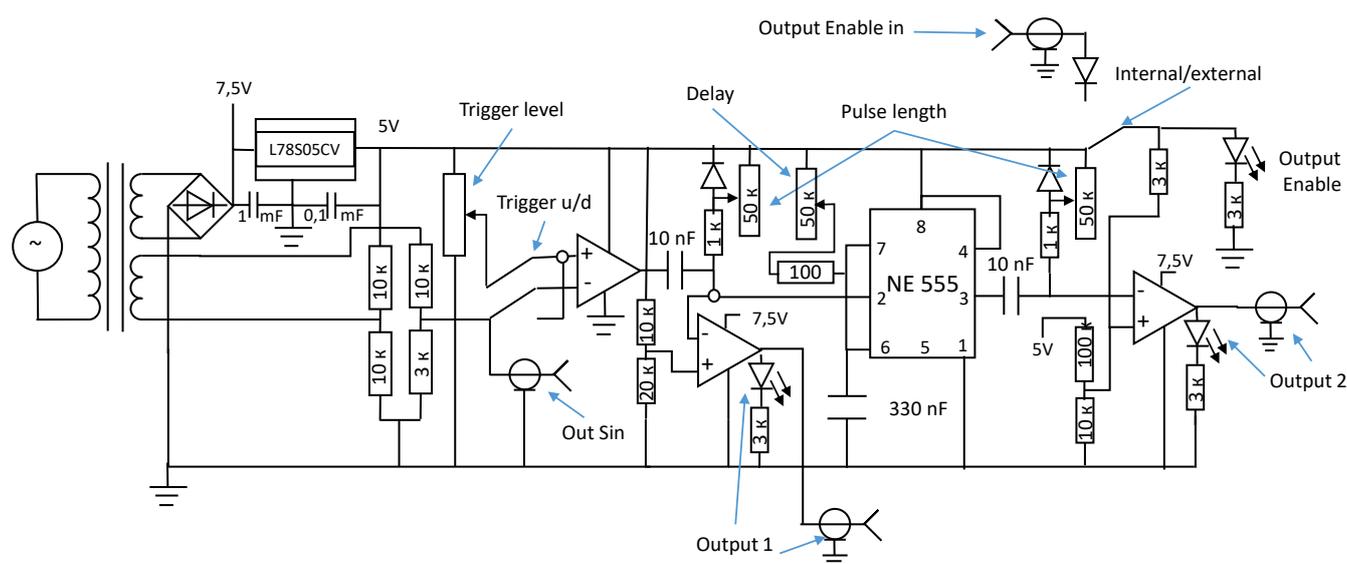
Конструкция прибора

Следующим этапом развития схемы синхронизации является добавление функции стробирования. Для эффективной синхронизации необходимо организовать процесс таким образом, чтобы синхронизирующий импульс шел на вход матрицы только тогда, когда система позиционирования выдаст импульс «Готов».

Моделирование и схемотехника обновленной схемы производились на сайте [1]. Эпюры напряжений отрисовывались там же.

В новой версии схемы (рис. 2) было решено отказаться от питания внешним источником, чтобы сделать устройство более компактным. Питание должно осуществляться по тем же проводам, по которым идет синхронизация по фазе с напряжением питания, поскольку диодный мост искажает форму синусоидального сигнала, было решено использовать две вторичные обмотки трансформатора. Напряжение со вторичной обмотки источника питания подается на диодный мост, после которого поступает на 5-вольтовый стабилизатор напряжения L78S05CV. Скачки напряжения на входе и выходе стабилизатора фильтруются двумя конденсаторами 1000 и 100 мкФ соответственно.

Конструирование реальной схемы имеет свои особенности. Идеальная схема компаратора не учитывает влияние входного напряжения, которое значительно ниже напряжения V_{cc} (этот вход соединен с землей). В реальной схеме при присоединении сигнальной обмотки отрицательный полупериод синусоиды «входит» в компаратор,

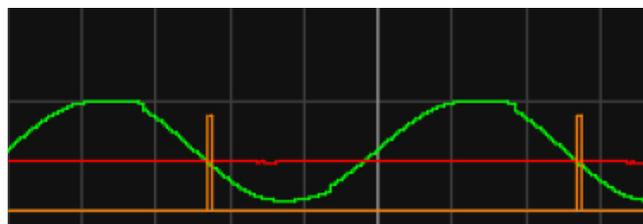


• Рис. 2. Итоговый вариант схемы синхронизации
 • Fig. 2. The final version of schematic diagram of the synchronization device

нагревая его и создавая фактически короткое замыкание. Для преодоления этого эффекта конец синхронизирующей обмотки присоединен к центру делителя напряжения $1/2$, который смещает ноль синусоиды до уровня 2,5 В. Второй делитель напряжения ограничивает амплитуду синусоиды до 2 В, удерживая сигнал в диапазоне 0–5 В. Такое решение позволило отказаться от использования дополнительных биполярных источников питания. Оно также позволило отказаться от использования потенциометров для регулировки амплитуды синусоидального напряжения. Теперь первичная регулировка осуществлялась с помощью одного потенциометра, который изменял опорное напряжение от 0 до 5 В. Эпюры напряжения при моделировании данной схемы приведены на рис. 3.

Выход компаратора подключен на дифференцирующую цепочку. Отрицательный импульс с нее подается на вход (2 на рис. 2) микросхемы таймера 555, запуская процесс зарядки времязадающей RC-цепочки с реостатом Delay. Выходной сигнал микросхемы с выхода (3) представляет собой прямоугольный импульс с длиной, ограниченной временем зарядки RC-цепочки. Микросхема 555 требует для запуска падения напряжения на входе (2) ниже $2/3$ напряжения питания. Для устойчивости системы переменный резистор шунтируется диодом с резистором меньшего сопротивления, что уменьшает время зарядки конденсатора RC-цепочки.

Во время зарядки времязадающего RC-контура микросхема 555 выдает логическую единицу на выходе, а по окончании процесса контур разряжается, выход замыкается на землю, а дифференцирующая цепочка подает на инвертирующий вход выходного усилителя отрицательный импульс, вызывая снижение напряжения на нем ниже уровня 50 %, чего достаточно для генера-



• Рис. 3. Эпюры напряжений на входах компаратора: зеленым обозначен сигнал 50 Гц; красным – опорное напряжение, настраиваемое потенциометром **Trigger Level**; оранжевым – импульсы синхронизации с **Output 1**. Режим работы триггера – по спаду

• Fig. 3. Voltage diagrams at the comparator inputs; green – the 50 Hz signal; red – the reference voltage adjusted by the **Trigger Level** potentiometer; orange – synchronization pulses from **Output 1**. The trigger operating mode is by decline

ции выходного импульса. В среде моделирования на неинвертирующий вход усилителя подается напряжение с делителя, на который поступает с входа **Output Enable in** в режиме **External** или +5 В в режиме **Internal**. В режиме **External** на этот выход подается сигнал только при подаче на логический вход единицы.

Здесь возникла еще одна трудность при работе вне режима биполярного питания: при напряжении на неинвертирующем входе ниже 0,4 В на выходе вместо нуля, ожидаемого для идеального усилителя, получается напряжение питания. Пришлось вносить в схему изменения и поднять «ноль» напряжения на инвертирующем входе на 0,5 В с помощью еще одного делителя, а на вход **Output Enable in** поместить диод во избежание смещения потенциала при подключении внешних устройств.

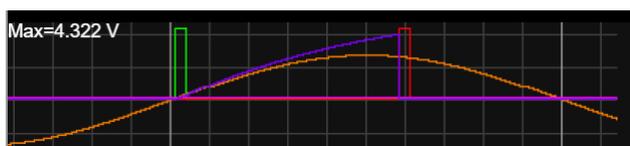
Длительность выходного импульса для выходов (1) и (2) настраивается с помощью сдвоенного реостата **Pulse length**.

Ввиду того, что на всех полупроводниках выходного каскада теряется 1,5–2 В (при питании от 5 В выходной импульс может не доходить до уровня логической единицы), выходные каскады питаются от напряжения 7,5 В, что дает на выходе импульс 6 В ценой возможной нестабильности амплитуды.

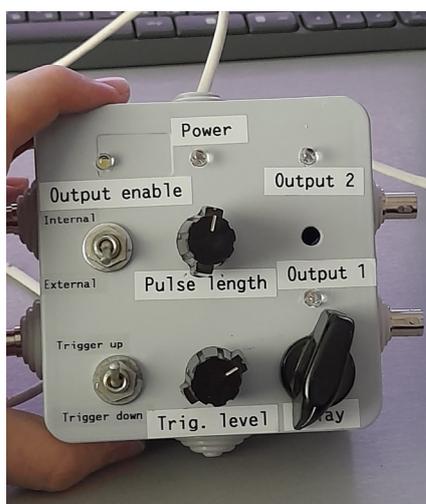
Кратко работу схемы можно описать следующим образом: в качестве источника сигнала для синхронизации аппаратуры используется электрическая сеть. Напряжение сети подается на понижающий трансформатор, вторичная обмотка которого подключается через систему делителей к одному из входов компаратора. На второй вход компаратора подается напряжение питания через потенциометр. Выходной сигнал с компаратора дифференцируется с помощью RC-цепочки, подтянутой к напряжению питания, после чего отрицательный скачок поступает на вход (2) таймера 555. Выходной сигнал с микросхемы также дифференцируется с помощью RC-цепочки. Сигналы обеих дифференцирующих цепочек подаются на выходные усилительные каскады. Эпюры напряжения приведены на рис. 4.

Выходные каскады построены на базе операционного усилителя LA6510 7N7 с максимальным током 1 А и скоростью нарастания выходного напряжения 0,15 В/мкс, что является достаточным для подачи сигнала на большинство устройств. Выходные сигналы также подаются на индикаторные светодиоды, что позволяет диагностировать работоспособность схемы без использования осциллографа.

Данная схема дает исчерпывающие возможности для синхронизации измерения с периодиче-



• Рис. 4. Эпюры напряжений времязадающей цепочки: оранжевый цвет – сигнал промышленной частоты; зеленый – импульс первого выхода схемы до системы задержки; синий – напряжение на времязадающей RC-цепочке; красный – выходной импульс
 • Fig. 4. Timing chain voltage diagrams: orange – industrial frequency signal; green – first output pulse of the circuit before the delay system; blue – voltage on the timing RC chain; red – output pulse



• Рис. 5. Собранная схема синхронизации с током промышленной частоты в пластиковом корпусе
 • Fig. 5. Industrial frequency synchronization circuit assembly with in a plastic case

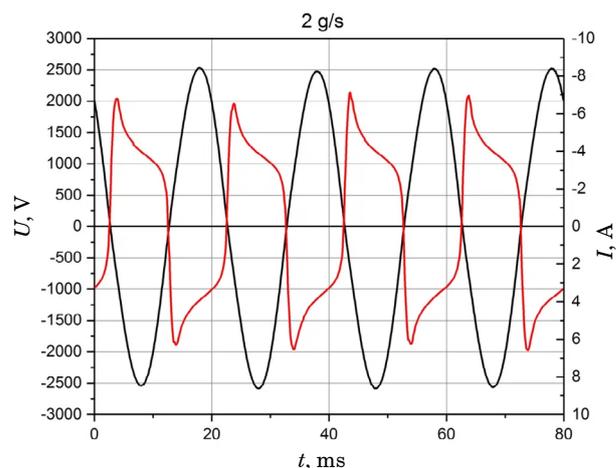
скими процессами, имеющими период 20 мс для промышленной частоты 50 Гц. Для частоты сети 60 Гц система должна быть также работоспособна. Общий вид прибора изображен на рис. 5.

Эксплуатация схемы

Схема тестировалась для спектрального анализа методом относительных интенсивностей плазмы электродугового плазмотрона промышленной частоты.

Плазмотрон питается током промышленной частоты от трансформатора с напряжением холостого хода 6 кВ. Ток ограничивается за счет высокой собственной индуктивности питающего трансформатора. Амплитуда тока достигает 7 А. Падение напряжения на дуге и ток изображены на рис. 6.

Электрическая дуга замыкается снаружи плазмотрона, генерируя поток плазмы, излучение

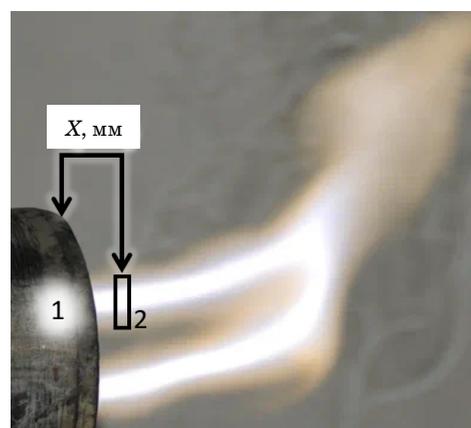


• Рис. 6. Осциллограммы тока и падения напряжения на дуге генератора плазмы в случае расхода рабочего тела (воздуха) 2 г/с. Для наглядности вторичная ось (ток) перевернута
 • Fig. 6. Oscillograms of current and voltage drop on the arc of the plasma generator in the case of a working fluid (air) flow rate of 2 g/s. For clarity, the secondary axis (current) is inverted

которого регистрируется спектрографом (DV420-ФК). Для сбора излучения используется система сбора света и фокусировки изображения струи на срез оптического волокна.

Для оперативного анализа температуры в определенной области струи (рис. 7) использовалась система локализации, сопряженная с системой синхронизации. Более подробно система описана в работах [2, 3].

Струя плазмы (рис. 2; 3) вблизи среза сопла представляла собой светящийся цилиндр с диаметром, близким к диаметру сопла. Внутри этого цилиндра была яркая область диаметром около 1 см. Внутренняя струя имела слегка сине-зеле-



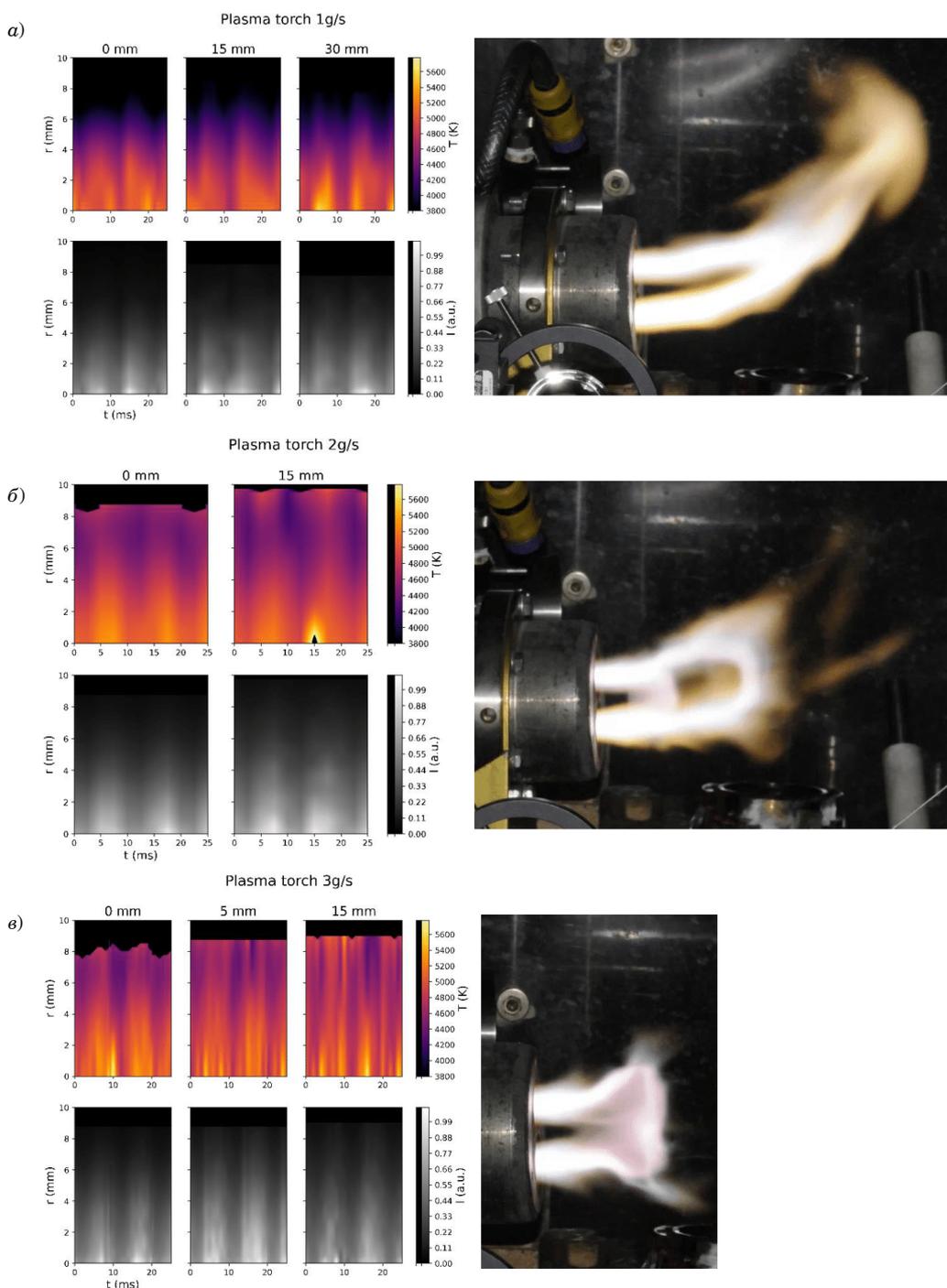
• Рис. 7. Фотография струи плазмы: 1 – корпус плазмотрона; 2 – область сканирования
 • Fig. 7. Photograph of a plasma jet: 1 – plasma torch body; 2 – scanning area

новатый оттенок, который создавало излучение атомов меди, по которому и производилось измерение электронной температуры внутренней области.

Так как установка работает от переменного тока 50 Гц, параметры плазмы не являются постоянными, а представляют собой переменные

величины с периодом 20 мс. Используемая в эксперименте матрица Andor DV420-ФК имеет минимальную экспозицию 1 мс, что позволяет снять без перекрытия 20 точек за период тока промышленной частоты.

Спектр фиксируется матрицей в момент поступления импульса от системы синхронизации.



• Рис. 8. Фотографии плазменного факела и двумерные графики зависимости температуры от времени на разном удалении от среза сопла и центра струи для массовых расходов воздуха 1 (а), 2 (б) и 3 (в) г/с
 • Fig. 8. Photographs of the plasma torch and two-dimensional graphs of the temperature dependence on time at different distances from the nozzle exit and the jet center for air mass flow rates of 1 (a), 2 (b) and 3 (v) g/s

Система работает в режиме накопления света. Оптимальным значением количества накопленных опытных путем было выбрано 50 (в случае работы с синхронизатором от сети промышленной частоты это приводит к регистрации одного кадра в секунду). В зонах, где исследуется плазменная струя, форма которой напоминает цилиндр, имеет смысл воспользоваться преобразованием Абеля для восстановления пространственной структуры плазмы в случае сканирования перпендикулярно струе.

Пространственно-временное распределение температуры плазмы дугового плазматрона

Картина пространственного и временного распределения температуры и интенсивности для разных расходов газа приведена на рис. 8. Из графиков видно, что струя имеет переменную во времени яркость. Для расхода воздуха 1 и 2 г/с было

снято порядка десяти измерений на период 20 мс. В случае 3 г/с измерения проводились со вдвое большим разрешением по времени. В некоторых сериях экспериментов измеренная интенсивность излучения у среза сопла ниже, чем на удалении. Это объясняется перекрытием части светового потока конструкцией сопла. В случае увеличения массового расхода плазмообразующего газа стабильность плазменной струи снижается.

Заключение

В рамках данной работы было сконструировано устройство синхронизации для исследования параметров плазмы, питаемой током промышленной частоты. Разработана схема, позволяющая синхронизировать различные устройства с питающим напряжением промышленной частоты. Также получены пространственно-временные картины распределения температуры и интенсивности свечения плазмы дугового разряда.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Falstad. Falstad circuit simulator. URL: <https://www.falstad.com/circuit/> (дата обращения: 31.01.2025).
2. Surov A. V., Dyachenko A. A., Nikonov A. V. Time-resolved spectral diagnostics of a high-voltage plasma torch. Tomsk: Publishing House Tomsk Polytechnic University, 2022. P. 248.
3. Дьяченко А. А., Пинчук М. Э. Автоматизированная система для сканирования пространственной структуры плазменной струи методом оптической эмиссионной спектроскопии // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 56–62. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-56-62.

REFERENCES

1. Falstad. Falstad circuit simulator. Available from: <https://www.falstad.com/circuit> [Accessed 31 January 2025].
2. Surov A. V., Dyachenko A. A., Nikonov A. V. Time-resolved spectral diagnostics of a high-voltage plasma torch. Tomsk: Publishing House Tomsk Polytechnic University; 2022, pp. 248. (In Russ.).
3. Dyachenko A. A., Pinchuk M. E. Automated system for scanning the spatial structure of a plasma jet using optical emission spectroscopy. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(1):56–62. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-56-62.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дьяченко Александр Андреевич, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории диагностики плазмы Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

Область научных интересов – создание и эксплуатация систем диагностики плазмы по эмиссионным спектрам.

Dyachenko Alexander A., Postgraduate Student, Junior Researcher at the Laboratory of Plasma Diagnostics, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – development and operation of plasma diagnostic systems using emission spectra.

Пинчук Михаил Эрнестович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией диагностики плазмы Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

Область научных интересов – физика газового разряда, применение электрического разряда в жидкости и газе, диагностика плазмы.

Суров Александр Викторович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией плазодинамических систем Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

Область научных интересов – электрофизика, механика жидкости газа и плазмы, разработка и исследование электродуговых генераторов плазмы, плазменные технологии.

Никонов Алексей Валерьевич, научный сотрудник лаборатории плазодинамических систем Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

Область научных интересов – создание, изучение и применение генераторов низкотемпературной плазмы.

Серба Евгений Олегович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории плазменных технологий Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

Область научных интересов – физика газового разряда, создание и исследование электродуговых генераторов низкотемпературной плазмы, плазменные технологии.

Наконечный Геннадий Валерьевич, научный сотрудник лаборатории плазменных технологий Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

Область научных интересов – разработка электродуговых генераторов термической плазмы и систем питания, плазменные технологии.

Попов Сергей Дмитриевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией плазменных технологий Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук.

Область научных интересов – разработка и создание плазменной техники, разработка и создание плазмохимических технологий.

Поступила в редакцию 26.12.2024

Поступила после рецензирования 10.01.2025

Принята к публикации 21.01.2025

Pinchuk Mikhail E., PhD in Technical Sciences, Head at the Laboratory of Plasma Diagnostics, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – physics of gas discharge, application of electric discharge in liquid and gas, plasma diagnostics.

Surov Alexander V., PhD in Technical Sciences, Head at the Laboratory of Plasma Dynamic Systems, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – electrophysics, fluid mechanics, gas and plasma, development and study of electric arc plasma generators, and plasma technologies.

Nikonov Aleksey V., Researcher at the Laboratory of Plasma Dynamic Systems, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – development, study, and application of low-temperature plasma generators.

Serba Evgeny O., PhD in Technical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Plasma Technologies, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – gas discharge physics, development and study of low-temperature plasma electric arc generators, and plasma technologies.

Nakonechny Gennady V., Researcher at the Laboratory of Plasma Technologies, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – development of electric arc thermal plasma generators and power supply systems, and plasma technologies.

Popov Sergey D., PhD in Technical Sciences, Head at the Laboratory of Plasma Technologies, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences.

Research interests – development and creation of plasma technology, the development and creation of plasma-chemical technologies.

Received 26.12.2024

Revised 10.01.2025

Accepted 21.01.2025

Нейросетевая коррекция навигационных систем высокоточных беспилотных летательных аппаратов на основе обучения нейросети без учителя

Михаил Евгеньевич Иванов¹

✉ sindbad1995@list.ru, orcid.org/0000-0002-7584-6946, SPIN-код: 6972-6135

Дмитрий Владимирович Решетников¹

eshetnikovdv@yandex.ru, SPIN-код: 8849-6584

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрен подход к коррекции инерциальных навигационных систем высокоточных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с помощью нейросетевых алгоритмов, который позволит обеспечить автономность БПЛА в целях устойчивости его полета в условиях гибридного воздействия на летательный аппарат.

Ключевые слова: инерциальные навигационные системы, нейросетевая коррекция, обучение нейросети с учителем

Для цитирования: Иванов М. Е., Решетников Д. В. Нейросетевая коррекция навигационных систем высокоточных беспилотных летательных аппаратов на основе обучения нейросети без учителя // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 68–73. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-68-73.

Original article

Neural network correction of navigation systems of high-precision unmanned aerial vehicles based on neural network training without a teacher

Mikhail E. Ivanov¹

✉ sindbad1995@list.ru, orcid.org/0000-0002-7584-6946, SPIN-code: 6972-6135

Dmitrij V. Reshetnikov¹

eshetnikovdv@yandex.ru, SPIN-code: 8849-6584

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The approach to correction of inertial navigation systems of high-precision unmanned aerial vehicles using neural network algorithms is considered, which will provide autonomy of high-precision unmanned aerial vehicles for the stability of its flight in the conditions of hybrid impact on the aircraft.

Keywords: inertial navigation systems, neural network correction, neural network training with a teacher

For citation: Ivanov M. E., Reshetnikov D. V. Neural network correction of navigation systems of high-precision unmanned aerial vehicles based on neural network training without a teacher. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):68–73. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-68-73.

Развитие микротехнологий, появление новых конструкционных материалов и новых типов элементов питания позволили создать высокоточные высокоманевренные беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые выполняют широкий круг задач, связанных с мониторингом подстилающей поверхности Земли и транспортировкой грузов на значительные расстояния. Как правило, полет подобных типов БПЛА осуществляется на малых высотах с огибанием рельефа местности в условиях искусственных и естественных помех, в том числе из-за гибридного воздействия злоумышленников.

Высокоточные маневренные БПЛА осуществляют полет по заранее спланированным маршрутам, совершая движение как с изменением скорости полета по величине или по направлению, или одновременно и по величине, и по направлению (взлет, посадка, вираж), так и с неизменяющейся по времени и направлению скоростью (горизонтальный полет, набор высоты и снижение). Для обеспечения полета БПЛА требуется система управления летательным аппаратом, которая на основе сигналов от датчиков первичной информации о навигационных параметрах полета выработывает сигналы управления. Для получения

навигационных параметров в БПЛА используются навигационные системы, построенные на разных физических принципах. Комплексование навигационной информации от разнотипных навигационных систем и их объединение в навигационные комплексы (НК) [1] позволяют снизить погрешность информации, полученной от чувствительных элементов.

Как правило, базовой системой НК является инерциальная навигационная система (ИНС), информация от которой дополняется другими системами – радиоэлектронными, оптоэлектронными, спутниковыми навигационными системами Глонасс/GPS. Погрешности в навигационной информации возникают из-за конструктивных особенностей самих систем, БПЛА, условий полета и характера внешних возмущающих помех. Информация от разнотипных навигационных систем поступает в вычислитель, где на основе алгоритма коррекции осуществляется комплексование навигационных датчиков сбора полетной информации [2, 3].

Основной системой НК являются ИНС, погрешности которых подразделяются на методические и инструментальные. Методические погрешности обусловлены нашими знаниями о физических процессах, влияющих на работу ИНС, развитием науки и технологий. Например, методические погрешности вызваны неточностями модели и карт гравитационного поля Земли, сознательным упрощением алгоритмов и сделанными допущениями. В свою очередь, инструментальные погрешности ИНС вызываются неидеальностью технической реализации алгоритмов и ошибками чувствительных элементов (акселерометров, гироскопов, датчиков угловых скоростей), таких как погрешность начальной выставки, смещение нуля акселерометров, собственный дрейф гироскопов и т. д.

Продолжительный полет БПЛА на значительные расстояния в условиях помех и гибридного воздействия злоумышленников приводит к существенному и неприемлемому возрастанию величины ошибок ИНС. Вынужденная автономность получения навигационной информации в условиях помех и невозможности из-за этого функционирования комплексных систем навигации приводят к необходимости совершенствования алгоритмов коррекции. Так, в статье [4] предлагается «выполнять компенсацию погрешностей ИНС в автономном режиме на основе информации, полученной в предшествующем корректируемом режиме, осуществлять с помощью прогнозных моделей. При краткосрочном прогнозе предлагается использовать априорные модели и линейные тренды. Для долгосрочного прогноза

модели строятся на борту ЛА. Получение реализуемых в БЦВМ прогнозных моделей рекомендовано проводить с помощью алгоритмов самоорганизации».

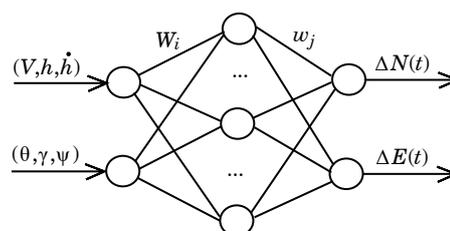
Для совершенствования алгоритмического обеспечения предлагается использовать подход к коррекции инерциальных навигационных систем высокоточных БПЛА с помощью нейросетевых алгоритмов, которые позволяют обеспечить автономность БПЛА в целях устойчивости его полета в условиях гибридного воздействия на летательный аппарат.

Суть подхода заключается в том, что НК БПЛА работает в двух режимах:

1) обычный режим функционирования НК (режим обучения нейронной сети), в рамках которого осуществляется использование архитектуры компенсации погрешностей измерений ИНС с помощью данных глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Архитектура компенсации содержит нейросетевой блок коррекции, и происходит процесс обучения нейронной сети;

2) автономный режим работы НК при гибридном воздействии на БПЛА (рабочий режим). Архитектура компенсации содержит нейронную сеть, обученную в обычном режиме функционирования НК, с помощью которой осуществляется прогноз координат местоположения БПЛА.

В работе [5] А. Б. Надером проводилось исследование с использованием схожей архитектуры, в которой обучение нейронной сети (НС) осуществлялось при помощи метода Левенберга – Марквардта (с учителем). В рамках данного исследования предлагается использовать для компенсации погрешностей НК обучение нейросетевой модели без учителя на основе эволюционного генетического алгоритма с целеполаганием повышения автономности БПЛА. На рис. 1 показана схема искусственной НС, используемой для коррекции основных параметров полета БПЛА: угла тангажа θ , угла крена γ , угла рысканья ψ , высоты полета h , вертикальной скорости \dot{h} , путевой



• Рис. 1. Структура искусственной нейронной сети (архитектура коррекции местоположения и скорости)
 • Fig. 1. Artificial neural network structure (location and speed correction architecture)

скорости V , формирующих векторы параметров навигации $\langle \mathbf{V}, \mathbf{h}, \mathbf{h} \rangle$ и параметров ориентации $\langle \theta, \gamma, \psi \rangle$. Данная схема является сетью прямого распространения с весами W_i первого слоя и весами w_j второго слоя, для которой в качестве входных данных используются векторы $\langle \mathbf{V}, \mathbf{h}, \mathbf{h} \rangle$ и $\langle \theta, \gamma, \psi \rangle$.

На выходе нейронной сети с учетом привязки работы ИНС к географической системе координат формируются параметры $\Delta N(t)$ и $\Delta E(t)$ – это вычисленные разницы координат по широте в направлении севера и по долготе в направлении востока. С учетом действия на ИНС БПЛА совокупностей внешних факторов естественного $W_{\text{ест}}$ и техногенного $W_{\text{техн}}$ происхождения общая структурно-функциональная схема НК примет вид, который показан на рис. 2.

Основополагающим звеном представленной схемы в рамках текущего исследования является блок нейросетевой коррекции, в котором уточняются формируемые в ИНС оценки измеряемых параметров полета $\langle \mathbf{V}, \mathbf{h}, \mathbf{h} \rangle$ и $\langle \theta, \gamma, \psi \rangle$, после чего преобразуются в координаты широты $\Delta N_{\text{НС}}(t)$ и долготы $\Delta E_{\text{НС}}(t)$. С целеполаганием повышения степени автономности БПЛА, использующего представленную интегрированную измерительную систему с нейросетевой коррекцией, предлагается обучение НС без учителя с применением генетического алгоритма (ГА). Математический аппарат ГА [6–8] основан на случайном поиске оптимальных значений искомых параметров по критерию максимума или минимума целевой функции оптимизации в зависимости от решаемой технической задачи. ГА – это эвристический метод поиска, используемый для решения задач

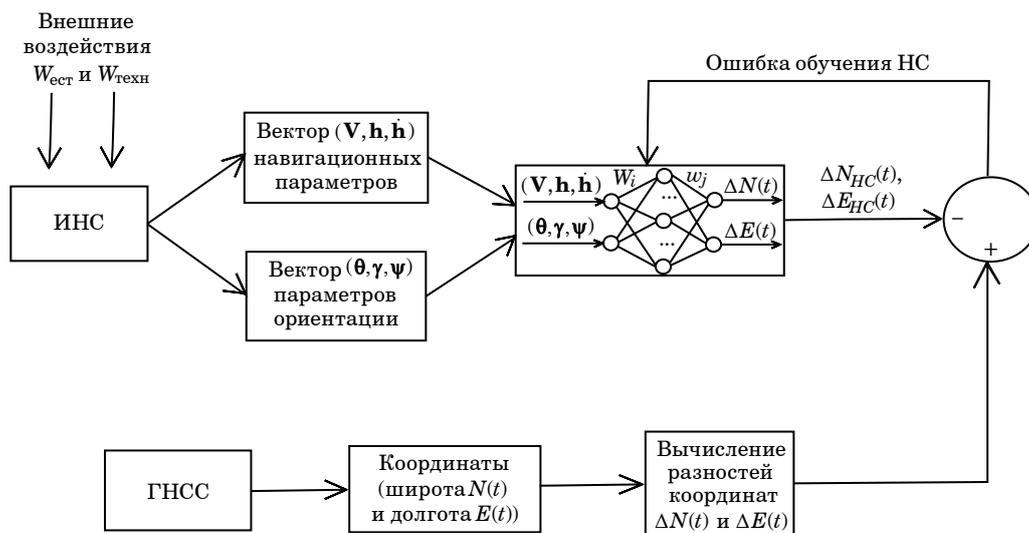
оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Основные положения и механизм работы ГА аналогичны тем же принципам естественного отбора, особенностью которого является использование операции «скрещивания» – рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе.

Применительно к постановке задачи синтеза НК с нейросетевой коррекцией целевая функция оптимизации (функция приспособленности) для самообучения НС при помощи ГА имеет следующий вид:

$$\begin{cases} f_N(\overline{Ch}) = \Delta N(t) - \Delta N_{\text{НС}}(t) \rightarrow 0 \\ f_E(\overline{Ch}) = \Delta E(t) - \Delta E_{\text{НС}}(t) \rightarrow 0 \end{cases} \quad (1)$$

Выражение (1) отражает основную суть работы НК – минимизация ошибки рассогласования показаний ИНС с нейросетевой коррекцией и ГНСС, которые в оптимальном случае должны стремиться к нулю. Следовательно, набором хромосом для работы ГА в рассматриваемой задаче обучения НС коррекции измерительной системы является индивидум – совокупность матриц весовых коэффициентов (2) (гены W_i и w_j введены в структурной схеме на рис. 1), случайным образом определенных некоторыми первоначальными значениями чисел.

После этого производится вычисление значений целевых функций с учетом ($k = 1, \dots, 6$) и методом колеса рулетки [9, 10] отбираются наиболее приспособленные к дальнейшему скрещи-



• Рис. 2. Общая структурно-функциональная схема НК в режиме обучения НС звена нейросетевой коррекции
 • Fig. 2. The general structural and functional scheme of the NC in the training mode of the NN link of neural network correction

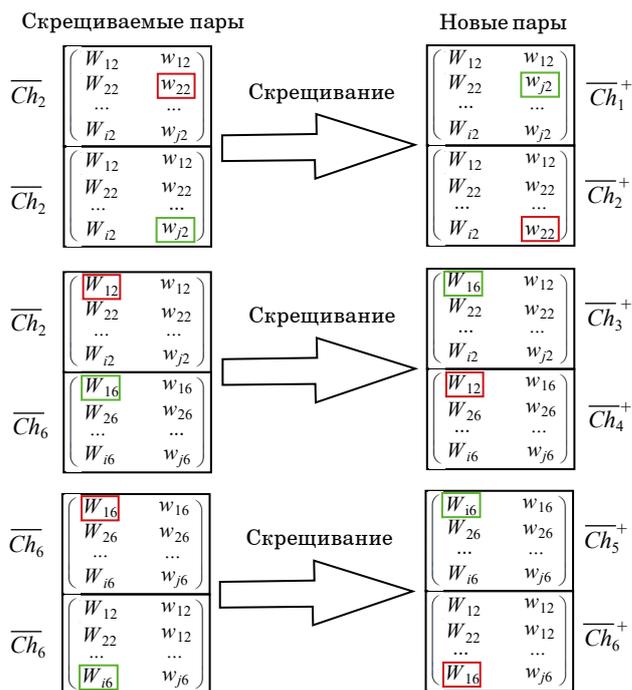
ванию особи. Следует заметить, что при задании малого числа матриц коэффициентов НС может возникнуть нежелательное явление преждевременной сходимости ГА к субоптимальному решению: в этом случае целесообразно использование другого механизма отбора особей, отличного от «колеса рулетки».

$$\begin{aligned}
 \overline{Ch}_1 &= \begin{pmatrix} W_{11} & w_{11} \\ W_{21} & w_{21} \\ \dots & \dots \\ W_{i1} & w_{j1} \end{pmatrix}, \quad \overline{Ch}_2 = \begin{pmatrix} W_{12} & w_{12} \\ W_{22} & w_{22} \\ \dots & \dots \\ W_{i2} & w_{j2} \end{pmatrix}, \\
 \overline{Ch}_3 &= \begin{pmatrix} W_{13} & w_{13} \\ W_{23} & w_{23} \\ \dots & \dots \\ W_{i3} & w_{j3} \end{pmatrix}, \\
 \overline{Ch}_4 &= \begin{pmatrix} W_{14} & w_{14} \\ W_{24} & w_{24} \\ \dots & \dots \\ W_{i4} & w_{j4} \end{pmatrix}, \quad \overline{Ch}_5 = \begin{pmatrix} W_{15} & w_{15} \\ W_{25} & w_{25} \\ \dots & \dots \\ W_{i5} & w_{j5} \end{pmatrix}, \\
 \overline{Ch}_6 &= \begin{pmatrix} W_{16} & w_{16} \\ W_{26} & w_{26} \\ \dots & \dots \\ W_{i6} & w_{j6} \end{pmatrix}. \tag{2}
 \end{aligned}$$

На следующем этапе осуществляется скрещивание (кроссинговер) отобранных пар матриц коэффициентов (индивидуумов). Пусть методом рулетки определены наиболее перспективные особи Ch_2 и Ch_6 – матрицы, которые будут наиболее часто встречаться среди пар для скрещивания. В случае, если для скрещивания отбираются пары $(Ch_2 - Ch_2)$, $(Ch_2 - Ch_6)$, $(Ch_6 - Ch_6)$, операция кроссинговера будет выглядеть так, как показано на рис. 3. При этом исключается возможность случайной мутации выбранных хромосом.

В результате выполнения операции кроссинговера сформируются новые матрицы коэффициентов НС: Ch_1^+ , Ch_2^+ , Ch_3^+ , Ch_4^+ , Ch_5^+ , Ch_6^+ , с которыми повторно вычисляются значения целевых функций оптимизации в выражении (1). Условием останова ГА является нахождение искомой матрицы коэффициентов НС

$$\overline{Ch}_{\text{опт}} = \begin{pmatrix} W_{1\text{опт}} & w_{1\text{опт}} \\ W_{2\text{опт}} & w_{2\text{опт}} \\ \dots & \dots \\ W_{i\text{опт}} & w_{j\text{опт}} \end{pmatrix}, \tag{3}$$



• Рис. 3. Пример скрещивания пар хромосом (матриц коэффициентов НС) со случайными точками скрещивания генов (весовых коэффициентов W_i и w_j) между хромосомами

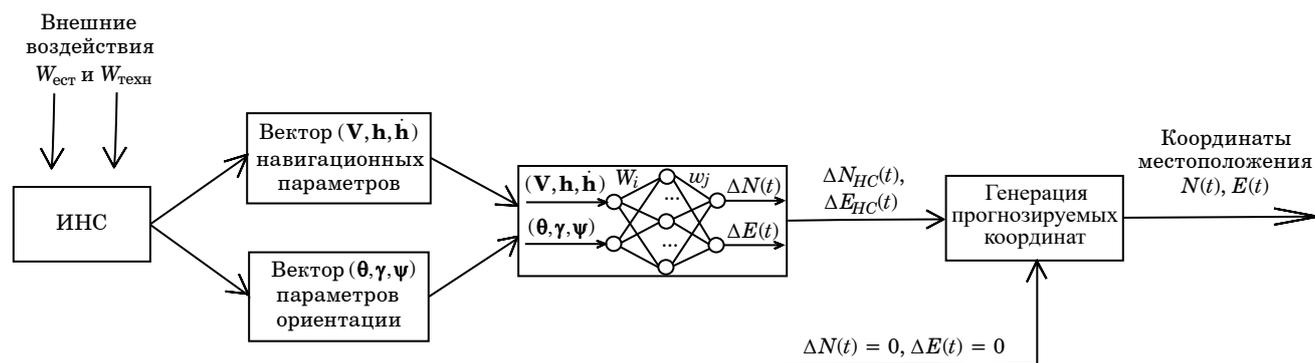
• Fig. 3. An example of crossing couples of chromosomes (matrices of NN coefficients) with random gene crossing points (weight coefficients W_i and w_j) between chromosomes

критерием оптимальности весовых коэффициентов НС является все то же выражение (1).

В результате обучения с использованием ГА структура НК с нейросетевой коррекцией, представленной ранее в режиме обучения НС блока коррекции, в рабочем режиме примет вид, показанный на рис. 4. В этом случае моделируется ситуация, когда измерительная система БПЛА в течение некоторого времени по какой-то причине не получает корректирующий сигнал от спутников ГНСС ($\Delta N(t) = 0$, $\Delta E(t) = 0$). С помощью обученной НС осуществляется прогноз координат $N(t)$ и $E(t)$ местоположения БПЛА, формируемых с достаточной степенью точности.

Следует заметить, что необходимым условием реализации представленной самообучаемой НС посредством ГА является ее адаптивность, поскольку на практике в большинстве случаев показатели внешних естественных и техногенных возмущающих факторов $W_{\text{ест}} \neq 0$, $W_{\text{техн}} \neq 0$. Поэтому процесс переобучения НС выполняется с целеполаганием ее адаптации к новой окружающей среде, в которой эксплуатируется БПЛА.

При всей эффективности ГА обладает одним заметным недостатком – возможность существенных временных и вычислительных затрат на реализацию. Следствием этого могут быть случаи



- *Рис. 4. Структурно-функциональная схема НК в рабочем режиме*
- *Fig. 4. Structural and functional scheme of the NC in operation mode*

дефицита времени, отведенного на реализацию процесса самообучения НС в измерительной системе БПЛА перед вводом в эксплуатацию. Для ускорения данного процесса описанный принцип обучения без учителя посредством ГА преобразуется в обучение с подкреплением. В этом случае для НС предоставляется необходимая поясняющая информация о выборке $\langle \mathbf{V}, \mathbf{h}, \mathbf{h} \rangle$ и $\langle \theta, \gamma, \psi \rangle$ входных данных (принимают значения в конкретном диапазоне, могут быть округлены до второго порядка после запятой и т. п.), благодаря чему сужается пространство поиска матрицы (3), оптимальной по критерию (1).

Таким образом, нами изложен подход к коррекции погрешностей автономной инерциальной

навигационной системы, возникающих при продолжительном и протяженном полете высокоточных и высокоманевренных БПЛА в условиях искусственных и естественных помех, в том числе из-за гибридного воздействия злоумышленников. Подход заключается в использовании нейросетевой модели без учителя на основе эволюционного генетического алгоритма. Применение данного подхода позволит повысить автономность высокоточного БПЛА без внесения конструктивных изменений, что позволит при проектировании выполнить требования заказчика по ограничению массогабаритных характеристик, стоимости и автономности БПЛА.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агеев В. М., Павлова Н. В. Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. М.: Машиностроение, 1990. 432 с.
2. Неусыпин К. А. Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 500 с.
3. Иванов М. Е., Езерский В. В. Метод оптимизации параметров измерителя путевой скорости низколетящего летательного аппарата на основе применения теории оптимальной фильтрации // Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 4. С. 78–85. Doi: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-78-85.
4. Пролетарский А. В., Неусыпин К. А. Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2012. № 3 (3). С. 216–223.
5. Аль Б., Гаврилов А. И. Компенсация погрешностей интегрированной навигационной системы с использованием искусственных нейронных сетей // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2020. № 2 (131). С. 4–26. Doi: 10.18698/0236-3933-2020-2-4-26.
6. Курейчик В. М. Генетические алгоритмы // Известия ЮФУ. Техн. науки. 1998. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geneticheskie-algoritmy> (дата обращения: 16.11.2024).
7. Pimenov V. I., Pimenov I. V. Interpretation of a trained neural network based on genetic algorithms // Information and control systems. 2020. № 6 (109). P. 12–20. Doi: 10.31799/1684-8853-2020-6-12-20.
8. Давронов Ш. Р. Обзор современных генетических алгоритмов и их применение на практике. Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2023. № 36 (483). С. 15–18. URL: <https://moluch.ru/archive/483/105878/> (дата обращения: 16.11.2024).
9. Михайлова А. Н. Использование метода колеса рулетки при решении задачи маршрутизации с помощью генетического алгоритма // Вестн. науки. 2020. № 5 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metoda-kolesa-ruletki-pri-reshenii-zadachi-marshrutizatsii-s-pomoschyu-geneticheskogo-algoritma> (дата обращения: 16.11.2024).

10. De Luca G. Roulette selection in genetic algorithms. URL: <https://www.baeldung.com/cs/genetic-algorithms-roulette-selection> (дата обращения: 16.11.2024).

REFERENCES

1. Ageev V. M., Pavlova N. V. Instrument complexes of aircraft and their engineering. Moscow: Mechanical engineering; 1990. 432 p. (In Russ.).
2. Neusypin K. A. Modern systems and methods of guidance, navigation and control of aircraft. Moscow: MGOU; 2009. 500 p. (In Russ.).
3. Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. Optimization of the parameters of a ground speed meter of low-flying aircraft based on the application of the theory of optimal filtration. Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering. 2023;22(4):78–85. (In Russ.). Doi: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-78-85.
4. Proletarskiy A. V., Neusypin K. A. Methods of correction of navigation systems and complexes of aircraft. Herald of the Bauman State Technical University. Series: Instrument engineering. 2012;(3(3)):216–223. (In Russ.).
5. Al B., Gavrilov A. I. Using artificial neural networks to compensate for the error in an integrated navigation system. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument engineering. 2020;(2(131)):4–26. (In Russ.). Doi: 10.18698/0236-3933-2020-2-4-26.
6. Kurejchik V. M. Genetic algorithms. Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 1998;(2). (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/geneticheskie-algoritmy> [Accessed 16 November 2024].
7. Pimenov V. I., Pimenov I. V. Interpretation of a trained neural network based on genetic algorithms. Information and control systems. 2020;(6(109)):12–20. Doi: 10.31799/1684-8853-2020-6-12-20.
8. Davronov Sh. R. Review of modern genetic algorithms and their application in practice. Young scientist. 2023;(36(483)):15–18. (In Russ.). Available from: <https://moluch.ru/archive/483/105878/> [Accessed 16 November 2024].
9. Mikhailova A. N. Using the roulette wheel method in solving the routing problem using a genetic algorithm. Bulletin of science. 2020;(5(26)). (In Russ.). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metoda-kolesa-ruletki-pri-reshenii-zadachi-marshrutizatsii-s-pomoschyu-geneticheskogo-algoritma> [Accessed 16 November 2024].
10. De Luca G. Roulette selection in genetic algorithms. Available from: <https://www.baeldung.com/cs/genetic-algorithms-roulette-selection> [Accessed 16 November 2024].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Евгеньевич Иванов, ассистент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – космонавтика, моделирование аэрокосмических систем управления, методы искусственного интеллекта.

Решетников Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – автономные системы навигации и управления, моделирование сложных технических систем, безопасность космической техники.

Поступила в редакцию 12.12.2024

Поступила после рецензирования 16.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Ivanov Mikhail E., Assistant at the Department of Operation and Control in Aerospace Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – astronautics, modeling of aerospace control systems, artificial intelligence methods.

Reshetnikov Dmitriy V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Operation and Control in Aerospace Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – autonomous navigation and control systems, modeling of complex technical systems, safety of space technology.

Received 12.12.2024

Revised 16.12.2024

Accepted 21.01.2025

Исследование экспериментальных образцов частично-когерентных источников излучения спектрофотометрической установкой

Евгений Евгеньевич Майоров¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-код: 8599-8975

Виктор Валентинович Курлов¹

vitek543@rambler.ru, orcid.org/0000-0002-0463-5578, SPIN-код: 4849-6737

Вера Павловна Пушкина¹

vera150465@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-1617-3937, SPIN-код: 8621-3620

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена проблема выбора источника света для частично-когерентных интерференционных приборов и систем. В настоящее время огромное внимание уделяется суперлюминесцентным светодиодам, потому что они являются оптимальными источниками света для низкокогерентной интерферометрии благодаря своим техническим характеристикам. Применение спектрального метода для выявления пиковой длины волны излучения, ширины спектра источника, которая определяет длину когерентности, значимо для низкокогерентной интерферометрии, поэтому настоящая работа актуальна и перспективна. Приведена функциональная схема измерительной установки. Получены спектральные параметры суперлюминесцентных светодиодов на разных гетероструктурах и рассчитаны длины когерентности для каждого источника света.

Ключевые слова: атомно-молекулярная структура, спектральный метод, суперлюминесцентный диод, пиковая длина волны излучения, ширина спектра, длина когерентности источника, гетероструктура

Для цитирования: Майоров Е. Е., Курлов В. В., Пушкина В. П. Исследование экспериментальных образцов частично-когерентных источников излучения спектрофотометрической установкой // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 74–78. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-74-78.

Original article

Investigation of experimental samples of partially coherent radiation sources by a spectrometric installation

Evgeny E. Maiorov¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-code: 8599-8975

Viktor V. Kurlov¹

vitek543@rambler.ru, orcid.org/0000-0002-0463-5578, SPIN-code: 4849-6737

Vera P. Pushkina¹

vera150465@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-1617-3937, SPIN-code: 8621-3620

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper considers the problem of choosing a light source for partially coherent interference devices and systems. Currently, great attention is being paid to superluminescent LEDs, because they are the optimal light sources for low-coherence interferometry due to their technical characteristics. The use of the spectral method to identify the peak wavelength of radiation, the width of the source spectrum, which determines the coherence length, is significant, therefore, this work is relevant and promising. As well as a functional diagram of the measuring installation is given. Spectral parameters of superluminescent LEDs on different heterostructures were obtained and the coherence lengths for each light source were calculated.

Keywords: atomic-molecular structure, spectral method, superluminescent diode, peak wavelength of radiation, spectral width, coherence length of the source, heterostructure

For citation: Maiorov E. E., Kurlov V. V., Pushkina V. P. Investigation of experimental samples of partially coherent radiation sources by a spectrometric installation. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):74–78. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-74-78.

Введение

Современное общество при познании мира опирается на разные подходы для исследования той или иной материи [1]. Познание микромира возможно с помощью такого инструмента, как спектроскопия. Спектральные приборы и системы предназначены для анализа самого излучения, испускаемого объектом исследования, которое несет информацию о ее строении [2]. Эти приборы и системы дают возможность изучать параметры излучения, непосредственно испускаемого физическими телами, а также исследовать результат взаимодействия с материей, которое проявляется в поглощении, отражении, рассеянии, пропускании или люминесценции излучения [3]. Итак, данный инструментарий позволяет разложить излучение в спектр и выделить наиболее важные отдельные спектральные линии; измерить интенсивность выделенного спектра или спектральной линии [4].

Исследуя атомно-молекулярную структуру вещества, можно с уверенностью констатировать тот факт, что при устойчивом состоянии атом имеет определенные значения энергии. При воздействии светового излучения на атом (поглощение кванта света) возникают переходы на более высокие уровни энергии, а при излучении атома – на более низкие [5]. Переходы соответствуют диапазону спектральных линий в спектрах поглощения и излучения атомов и молекул [6]. Спектральная линия определяет уровень энергии и внутреннее строение атома, интенсивность прогнозируемых переходов между уровнями. По ширине и контуру отдельной линии – температуру, при которой излучает объект [7]. Во многих научных работах по спектроскопии определено, что интенсивность спектральных линий пропорциональна числу излучаемых атомов [8]. А это означает, что по этому параметру можно определить процентное содержание отдельных элементов, входящих в состав исследуемого объекта, используя для сравнения уже известные образцы с содержанием этих элементов.

Инструментарий спектроскопии разнообразен, и принято различать его по оптическим характеристикам – рабочему диапазону спектра; дисперсии; диспергирующему элементу (призма, дифракционная решетка, интерферометр); светосиле (малая, средняя, большая); характеру оптики (линзовая, зеркальная); быстродействию [5–8].

В настоящее время огромное внимание уделяется таким источникам излучения, как суперлюминесцентные светодиоды, потому что они являются оптимальными источниками света для частично-когерентной интерферометрии,

рефлектометрии, для различного назначения гироскопов, построенных на квазиодномодовых оптических волокнах [9]. Уникальность этих источников света заключается в том, что они переняли определенные свойства у инжекционных лазеров и у источников белого света, использующихся в различных конструкциях оптико-электронных приборов и комплексов [10]. Многие исследователи отмечают у суперлюминесцентных светодиодов широкий спектр излучения, высокое оптическое усиление благодаря соединительным группам – InP, InAs, InSb, CdS, CdTe, PbSe и GaAs [11]. Суперлюминесцентные светодиоды имеют малую пространственную или временную когерентность, низкие внутренние шумы, широкий спектр излучения, центральную длину волны излучения [12].

При контроле грубых поверхностей (первого, второго класса чистоты поверхности) применяют двухлучевую интерференционную схему, где в качестве источника света используют суперлюминесцентные источники света с разными длинами волн (λ), выходными мощностями ($P_{\text{вых}}$), длинами когерентности (l_c) и т. д. [11–14]. В научной литературе многими авторами отмечается тот факт, что интерференционная картина видна в двух лучевых интерферометрах только в пределах длины когерентности источника излучения. Очевидно, что при малой l_c максимальное значение выходного оптического сигнала будет определяться точнее, чем при большой l_c , следовательно, регистрация микрорельефа поверхности будет вестись с минимальной погрешностью.

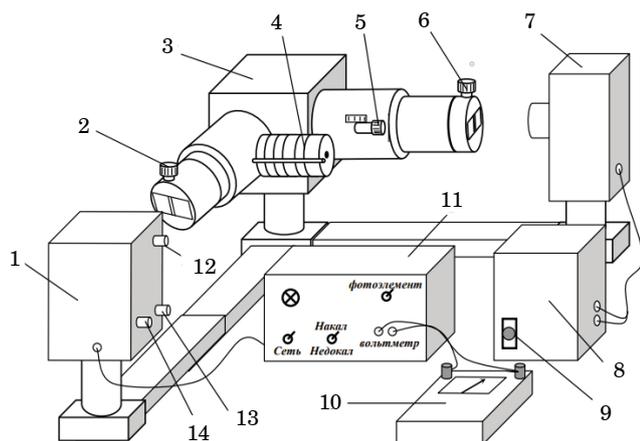
Поэтому интерес представляет исследование спектральных характеристик суперлюминесцентных светодиодов на основе многослойных гетероструктур.

Спектральное исследование экспериментальных образцов источников излучения для частотно-когерентной интерферометрии и явилось **целью** работы.

Задача исследования – с помощью экспериментальной измерительной установки, работающей в диапазоне длин волн от 360 до 1600 нм, провести измерения спектров суперлюминесцентных светодиодов на основе многослойных гетероструктур.

Материал и методы исследования

Объекты исследования – экспериментальные образцы суперлюминесцентных светодиодов на базе следующих гетероструктур: (InGa)N, (InGa)As. Все испытываемые образцы были предоставлены



• Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной измерительной установки: 1 – фотоприемное устройство; 2 – регулятор выходной щели; 3 – монохроматор; 4 – барабан; 5 – регулировка фокусировки; 6 – регулятор входной щели; 7 – источник излучения; 8 – пусковой блок; 9 – кнопка включения; 10 – измерительный прибор; 11 – блок питания; 12 – регулировка диафрагмы; 13 – установка нуля темного тока; 14 – переключатель чувствительности измерительной системы

• Fig. 1. Functional diagram of the experimental measuring installation: 1 – photodetector; 2 – output slit regulator; 3 – monochromator; 4 – drum; 5 – focus adjustment; 6 – input slit regulator; 7 – radiation source; 8 – starting block; 9 – power button; 10 – measuring device; 11 – power supply unit; 12 – aperture adjustment; 13 – dark current zero setting; 14 – sensitivity switch of the measuring system

одной из российских компаний – производителей источников светового излучения. Производитель нуждался в независимом контроле спектральных параметров данных образцов.

Для исследований использовалась установка, которая показана на рис. 1 [1].

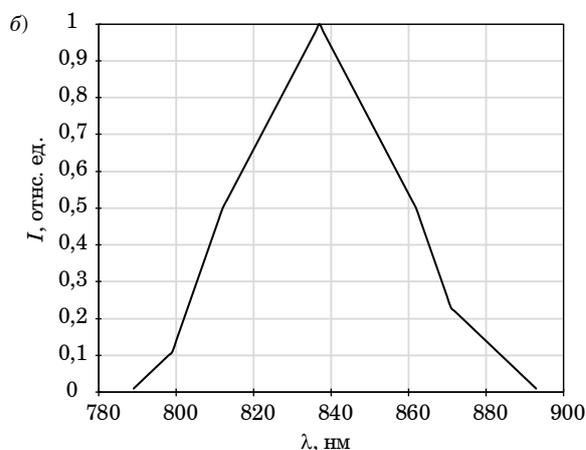
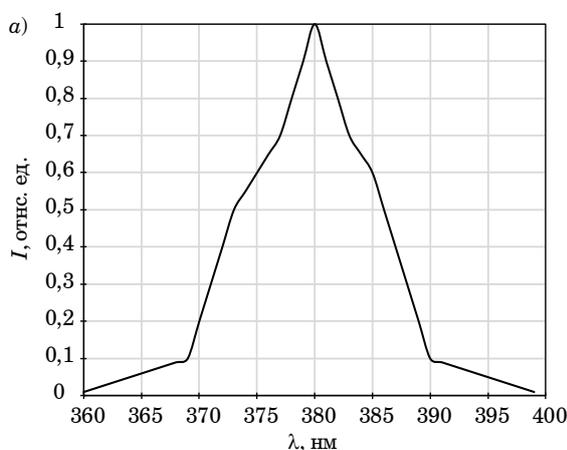
Установка для измерения спектров излучения состояла из монохроматора, фотоприемной системы, измеряемых источников света и пускового

блока. Фотоприемная система состояла из линейки фотодиодов, блока питания с подключенным цифровым вольтметром. Регистрацию интенсивности излучения в относительных единицах осуществляли по шкале цифрового вольтметра. Установка имела аналого-цифровой преобразователь, и через универсальный вход данные поступали на персональный компьютер, где обрабатывались и представлялись в графическом виде.

В установке использовалась модифицированная призма с рабочим диапазоном спектра 375...1600 нм. В установке можно изменять ширину щели. Фокусное расстояние объективов составляло 420 мм. Призма Аббе приводилась в движение барабаном.

Результаты исследования и их обсуждение

Для проведения эксперимента суперлюминесцентные светодиоды включали в специально разработанную плату, которая размещалась в блоке для установки испытуемых образцов. На рис. 2 показаны спектральные кривые экспериментальных образцов. Представленные образцы имели похожую конструкцию и отличались по составу активного слоя, толщина которого была у всех одинакова и составляла 12 нм. Спектральные характеристики образцов, представленные графически, отличались по ширине, но имели схожую колоколообразную форму. Разный химический состав активного слоя при его постоянной толщине в суперлюминесцентных диодах при излучении дает возможность выявлять пиковую длину волны излучения λ_m и определять ширину спектра $\Delta\lambda$ излучения.



• Рис. 2. Спектральные характеристики суперлюминесцентных светодиодов на разных гетероструктурах: а – (InGa)N; б – (InGa)As

• Fig. 2. Spectral characteristics of superluminescent LEDs on different heterostructures: а – (InGa)N; б – (InGa)As

- *Спектральные параметры источников излучения*
- *Spectral parameters of radiation sources*

Состав активного слоя	λ_m , нм	$\Delta\lambda$, (нм)	l_c , мкм
(InGa)N	387	22	6,8
(InGa)As	833	30	23,1

По формуле $l_c = \lambda_m^2 / \Delta\lambda$ рассчитаны значения длины когерентности для каждого источника излучения. В таблицу сведены основные спектральные параметры излучения суперлюминесцентных светодиодов.

Заключение

В процессе эксперимента исследованы источники суперлюминесцентного излучения на основе многослойных гетероструктур. Экспериментальным путем получены пиковая длина волны, ширина спектра излучения и рассчитанные по ним длины когерентности источников излучения. При сравнении спектральных параметров выбран источник света, который улучшит технические характеристики интерференционных систем, работающих в низкокогерентном свете. Образец на базе (InGa)N с $\lambda_m = 387$ нм, $\Delta\lambda = 22$ нм, $l_c = 6,8$ мкм является оптимальным источником излучения для низкокогерентной интерферометрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. 1970, 855 с.
2. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пурыев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1987, 264 с.
3. Тарасов К. И. Спектральные приборы. М.: Машиностроение. 1968, 389 с.
4. Исследование голографических материалов методом спектрального анализа / Е. Е. Майоров [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 519–524. Doi: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-519-524.
5. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Исследование оптических клиньев для оптических и оптико-электронных приборов и комплексов спектральным методом // Приборы. 2023. № 4. (274). С. 41–44.
6. Малакара Д. Оптический производственный контроль / пер. с англ. под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение. 1985. 340 с.
7. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
8. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с.
9. Суперлюминесцентные диоды на основе двухслойных асимметричных наногетероструктур / Е. В. Андреева [и др.] // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 10. С. 931–935.
10. SLD-based broad-band light sources with bell-shaped spectra in the range of 800–900 nm / E. V. Andreeva [et al.] // 1st symp. on OCT for non-destruct. testing: abstract collection (Linz, Austria), 2013. P. 93–95.
11. Поперечно-одномодовые суперлюминесцентные диоды ближнего ИК-диапазона спектра с непрерывной выходной мощностью до 100 мВт / Е. В. Андреева, С. Н. Ильченко, Ю. О. Костин, С. Д. Якубович // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 10. С. 903–906.
12. Мощный широкополосный одномодовый InGaAsP/InP суперлюминесцентный диод / Н. А. Пихтин [и др.] // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, вып. 15. С. 16–22.
13. Суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 1,5...1,6 мкм на основе напряженно-компенсированных квантовых ям AlGaInAs/InP / Д. Р. Сабитов [и др.] // Квантовая электроника. 2020. Т. 50, № 9. С. 830–833.
14. Исследование характеристик излучения маломощных суперлюминесцентных диодов в диапазоне температур –55...+93 °С / Д. С. Мамедов, В. В. Прохоров, М. В. Шраменко, С. Д. Якубович // Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 7. С. 593–596.

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. Fundamentals of optics. Moscow: Nauka; 1970. 855 p. (In Russ.).
2. Kreopalova G. V., Lazareva N. L., Puryaev D. T. Optical measurements. Moscow: Mechanical engineering; 1987. 264 p. (In Russ.).
3. Tarasov K. I. Spectral devices. Moscow: Mechanical engineering; 1968. 389 p. (In Russ.).
4. Maiorov E. E., Kurlov V. V., Borodyansky Yu. M., Dagaev A.V., Tayurskaya I. S. Investigation of holographic materials by spectral analysis method. Journal of Instrument Engineering. 2024;67(6):519–524. (In Russ.). Doi: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-519-524.

5. Maiorov E. E., Kostin G. A., Chernyak T. A. Investigation of optical wedges for optical and optoelectronic devices and complexes by the spectral method. *Instruments*. 2023;(4(274)):41–44. (In Russ.).
6. Malakara D. Optical production control; trans. from English eds by A. N. Sosnova. Moscow: Mechanical engineering; 1985. 340 p. (In Russ.).
7. Afanasyev V. A. Optical measurements. Moscow: Nedra; 1968. 263 p. (In Russ.).
8. Akhmanov S. A., Dyakov Yu. E., Chirkin A. S. Introduction to statistical radiophysics and optics. Moscow: 1981; 640 p. (In Russ.).
9. Andreeva E. V., Ilchenko S. N., Ladugin M. A., Marmalyuk A. A., Pankratov K. M., Shidlovsky V. R., Yakubovich S. D., Superluminescent diodes based on two-layer asymmetric nanoheterostructures. *Quantum electronics*. 2019;49(10):931–935. (In Russ.).
10. Andreeva E. V., Chamorovsky A. Yu., Ilchenko S. N., Kostin Yu. O., Lapin P. I., Yakubovich S. D. SLD-based broadband light sources with bell-shaped spectra in the range of 800–900 nm. 1st symp. on OCT for non-destruct. testing: abstract collection (Linz, Austria); 2013, pp. 93–95.
11. Andreeva E. V., Ilchenko S. N., Kostin Yu. O., Yakubovich S. D. Transverse-single-mode superluminescent diodes of the near-infrared range of the spectrum with continuous output power up to 100 MW. *Quantum electronics*. 2014;44(10):903–906 (In Russ.).
12. Pikhtin N. A., Ilyin Yu. V., Leshko A. Yu., Lutetsky A. V., Stankevich A. L., Tarasov I. S., Fetisova N. V. Powerful broadband single-mode InGaAsP/InP superluminescent diode. *Letters in ZhTF*. 1999;25(is. 15):16–22. (In Russ.).
13. Sabitov D. R., Ryaboshtan Yu. L., Svetogorov V. N., Padalitsa A. A., Ladugin M. A., Marmalyuk A. A., Vasiliev M. G., Vasiliev A. M., Kostin Yu. O., Shelyakin A. A. Superluminescent diodes of the spectral range 1.5...1.6 μm based on stress-compensated quantum wells AlGaInAs/InP. *Quantum electronics*. 2020;50(9):830–833 (In Russ.).
14. Mamedov D. S., Prokhorov V. V., Shramenko M. V., Yakubovich S. D. Investigation of radiation characteristics of low-power superluminescent diodes in the temperature range – 55...+93 °C. *Quantum electronics*. 2002;32(7):593–596. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Майоров Евгений Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – физическая оптика, оптическое приборостроение.

Курлов Виктор Валентинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – инновационное приборостроение.

Пушкина Вера Павловна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системный анализ и управление, математическое моделирование нелинейных процессов.

Maiorov Evgeny E., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – physical optics, optical instrumentation.

Kurlov Viktor V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – innovative instrumentation.

Pushkina Vera P., PhD in Economics Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – system analysis and management, mathematical modeling of nonlinear processes.

Поступила в редакцию 11.12.2024

Поступила после рецензирования 17.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Received 11.12.2024

Revised 17.12.2024

Accepted 21.01.2025

Научная статья
УДК 535.3:681.787

DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-79-84

Применение микроинтерференционного метода для реконструирования томографических данных по оптическим неоднородностям элементов микрооптики

Евгений Евгеньевич Майоров¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-код: 8599-8975

Александр Владимирович Арефьев¹

aaref@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-2860-790X, SPIN-код: 6717-1819

Рамиз Балахан оглы Гулиев¹

ramiz63@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-2812-1774, SPIN-код: 4263-7494

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Исследование посвящено применению микроинтерференционного метода для реконструирования томографических данных по оптическим неоднородностям элементов микрооптики. Успехи, достигнутые в микроэлектронике, микрооптике, ведут к миниатюризации элементов оптоэлектронных приборов и комплексов, поэтому исследование микроинтерференционного методом микрокомпонент актуально и перспективно. Приведена функциональная схема измерительной установки. Получены распределения коэффициента отражения по глубине и определена свильность для элементов микрооптики.

Ключевые слова: оптическая неоднородность, микроинтерференционный метод, микрооптика, точность измерений, глубина анализа, микролинзы

Для цитирования: Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б. Применение микроинтерференционного метода для реконструирования томографических данных по оптическим неоднородностям элементов микрооптики // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 1. С. 79–84. DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-79-84.

Original article

Application of the microinterference method for reconstructing tomographic data on optical inhomogeneities of microoptic elements

Evgeny E. Maiorov¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-code: 8599-8975

Alexander V. Arefyev¹

aaref@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-2860-790X, SPIN-code: 6717-1819

Ramiz B. Guliyev¹

ramiz63@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-2812-1774, SPIN-code: 4263-7494

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The present work is devoted to the application of the microinterference method for reconstructing tomographic data on optical inhomogeneities of microoptic elements. The successes achieved in microelectronics and microoptics lead to the miniaturization of elements of thermal engineering devices and complexes, therefore, the study of microinterference by the microcomponent method is relevant and promising. Functional diagram of the measuring installation is given. The distributions of the reflection coefficient over depth are obtained and the luminosity for the elements of micro optics is determined.

Keywords: optical inhomogeneity, microinterference method, micro optics, measurement accuracy, depth of analysis, microlenses

For citation: Maiorov E. E., Arefyev A. V., Guliyev R. B. Application of the microinterference method for reconstructing tomographic data on optical inhomogeneities of microoptic elements. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2025;4(1):79–84. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2025-1-79-84.

Введение

Развитие экспериментальной базы научных исследований полупроводников привело к появ-

лению новых направлений в электронике, фотонике, оптических технологиях и т. д. [1]. В этих направлениях огромное внимание уделяется размерам микроэлементов, микрокомпонентов для

разработки оптических систем современных оптических и оптико-электронных приборов и комплексов [2]. Появление в научно-исследовательских лабораториях, на производствах компактных полупроводниковых лазеров, новой элементной базы для волоконно-оптических датчиков и линий связи дает возможность специалистам выходить на новый уровень измерений [3].

Успехи, достигнутые в микроэлектронике, микрооптике ведут к миниатюризации элементов оптоэлектронных приборов и комплексов [4]. Широкое применение волоконно-оптических датчиков и систем в различных технологиях, линейных и матричных полупроводниковых лазеров в науке и промышленности, интегральных фотонных чипов для специальных задач, микросистемной техники в интегрированных конструкциях – все это диктует необходимость интенсивного развития микрооптики в целом [5]. Для производства конкурентоспособной компонентной базы микрооптики необходимы современные технологии, такие как ионно-молекулярный обмен, фотолитография, лучевые технологии [6]. Среди всего многообразия технологических процессов формирования микроструктурных элементов исследователи отмечают лазерные и оптико-информационные технологии.

Создание формы микрооптического элемента происходит за счет взаимодействия лазерного излучения с веществом. Точность передачи формы определяется размерами и формой затвердевшего материала, который сохраняет физико-химические и оптические характеристики [7].

Оптические неоднородности (свильность) существенным образом влияют на качество изображений, передачу высококогерентного, частично-когерентного излучения от источника к приемнику, на качество передачи оптического по оптико-волоконному кабелю и т. д. [8]. В оптических и оптико-электронных приборах и системах различного назначения применяют оптические микроэлементы, изготовленные из бромида калия (KBr) (оптические системы интерферометров, микроскопов, спектрофотометров и т. д.) [9]. Чем выше требования к используемым компонентам оптических систем, тем более жесткий контроль к их физико-химическим и оптическим характеристикам. Существующие технологии изготовления микрооптики обеспечивают выпуск качественной продукции на 95 %, исключая нитевидные и ленточные флуктуации показателя преломления, а 5 % допускают оптические неоднородности.

Поэтому интерес представляет исследование свильности у двояковыпуклой, плосковыпуклой и двояковогнутой микролинз, которые являются основными элементами оптических систем.

Целью работы стало определение свильности у микрооптических элементов оптических систем экспериментальной интерференционной установкой, применяемой для реконструирования томографических результатов измерений.

Задача исследования – с помощью экспериментальной интерференционной установки, работающей в режиме реконструкции томографических измерений, выявить свили у предоставленных оптических микроэлементов заводом – производителем оптических изделий.

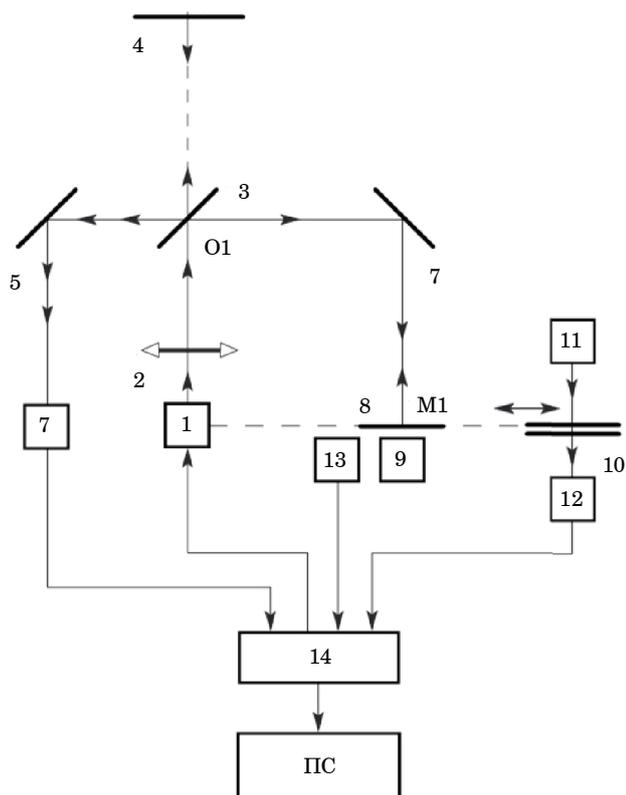
Материал и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали микрооптические элементы – двояковыпуклые, плосковыпуклые и двояковогнутые микролинзы, изготовленные из бромида калия (KBr). Данный материал имеет пропускную способность в диапазоне от 0,230 до 28 мкм, гигроскопичен, легко раскалывается. Выращен методом Кирополуса. При изготовлении микролинз не наблюдалось больших температурных градиентов на фронте кристаллизации. Производитель отмечает, что при изготовлении микрооптических компонентов из этого материала не наблюдаются дефекты в кристаллической решетке и отсутствуют внутренние напряжения. Весь процесс выполняется в инертной атмосфере (аргон или в условиях высокого вакуума).

У всех образцов диаметр равен 3 мм, толщина кромки – 0,5 мм, толщина по оси у двояковыпуклых, плосковыпуклых микролинз равнялась 1 мм, а у двояковогнутых микролинз – 0,35 мм.

Для исследований использовалась установка, которая показана на рис. 1.

Интерференционная установка построена по классической схеме (схема Майкельсона). В одну из ветвей интерферометра помещен микрооптический элемент. Источником излучения (1) был твердотельный лазер с генерацией второй гармоники с длиной волны 0,532 мкм (Nd:YAG-лазер, алюмо-иттриевый гранат YAG, $Y_3Al_5O_{12}$, легированный ионами неодима Nd. Микрообъектив (2) (7-кратный, $f = 7,5$ мм, $A = 0,2$) фокусировал световое пятно в опорную и объектную ветви. Процесс измерений заключался в следующем: компенсируя разность хода в ветвях интерферометра, получали максимум интерференционной картины. Зеркало (8) приводилось в движение посредством модулятора (9). Когда расстояния выравнивались в ветвях интерферометра, на мониторе персонального компьютера наблюдался максимум амплитуды интерференционного сигнала. При перемещении (8) изменение расстояния в опорной ветви фиксировалось парой диф-



• Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной интерференционной томографической установки: 1 – фотодетектор; 2 – микрообъектив; 3 – светоделиватель; 4 – объект исследования; 5, 7, 8 – зеркала; 6, 12 – фотоприемные устройства; 9 – модулятор; 10 – дифракционные решетки; 13 – датчик скорости; 14 – электронный блок; ПС – персональный компьютер

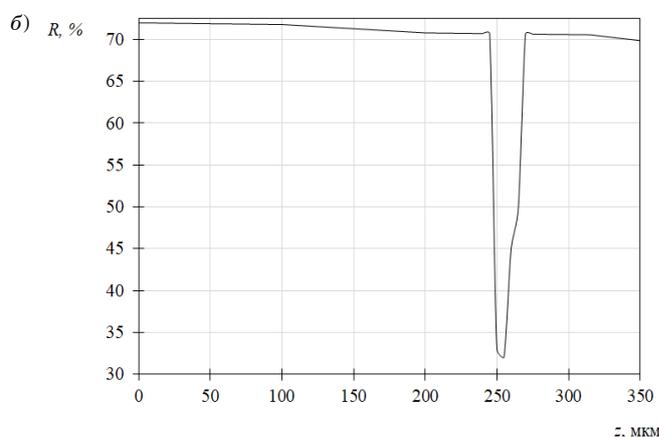
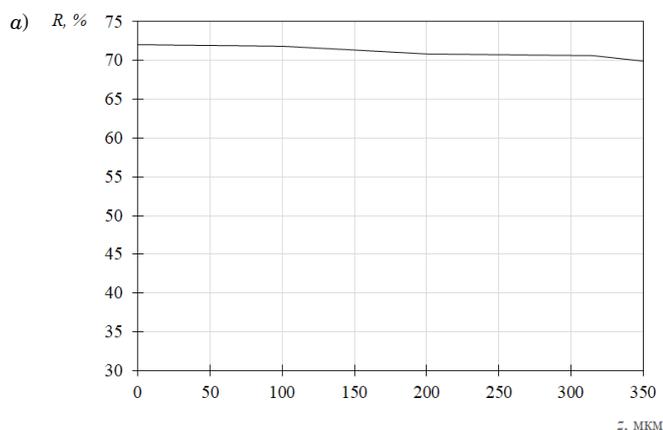
• Fig. 1. Functional diagram of the experimental measuring installation: 1 – photodetector; 2 – output slit regulator; 3 – monochromator; 4 – drum; 5 – focus adjustment; 6 – input slit regulator; 7 – radiation source; 8 – starting block; 9 – power button; 10 – measuring device; 11 – power supply unit; 12 – aperture adjustment; 13 – dark current zero setting; 14 – sensitivity switch of the measuring system; ПС – computer

рационных решеток (10), причем одна зафиксирована, а другая неразъемно связана с (8).

Перемещение решеток относительно друг друга на рис. 1 показано стрелкой. Шаг решеток равен 1 мкм. Решетки освещались источником излучения (11), а сигнал фиксировался фотоприемным устройством (12). Начало отсчета определялось поверхностью микрооптического элемента, что составляло максимальное значение интерференционного сигнала.

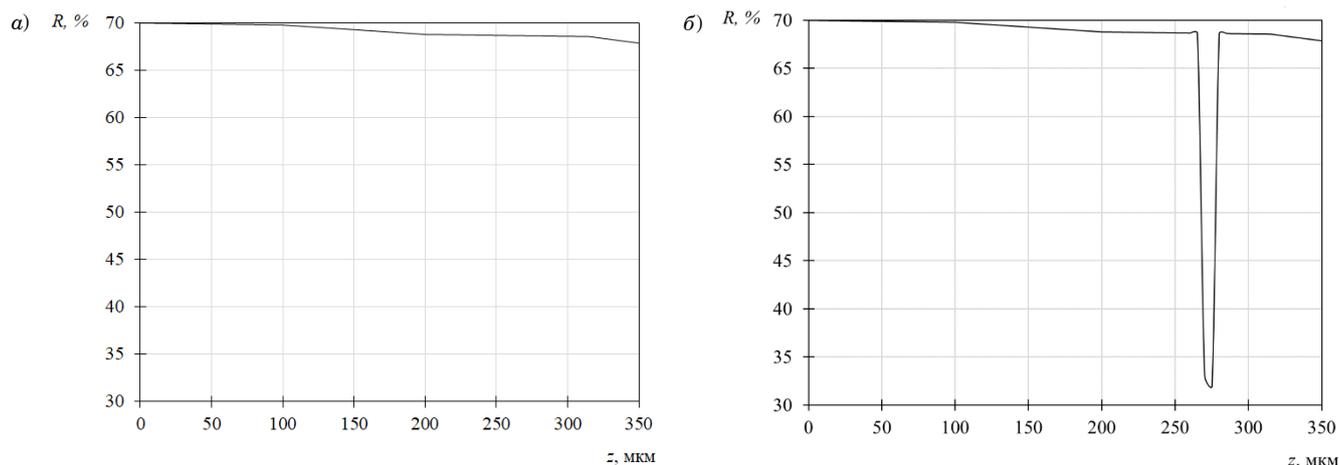
Результаты исследования и их обсуждение

Для проведения эксперимента поверхности микрооптических элементов ориентировали по нормали к световому лучу. В процессе измерений исследовали линейный участок длиной, равной 3 мм, по всей глубине $z = 350$ мкм испытуемых образцов. Контроль осуществлялся поточно с частотой 120 Гц. Для графической визуализации результатов измерений использовали специально разработанный программный продукт. На рис. 2–4 показаны графические зависимости распределения коэффициента отражения по глубине оптического материала. Эксперимент проводили на качественных элементах микрооптики, а также на имеющих оптические неоднородности по глубине от 0 до 300 мкм. Элементы микрооптики, имеющие свили, для человеческого глаза были практически незаметными и могли беспрепятственно использоваться в оптических и оптико-электронных приборах и комплексах. Из рис. 2–4 видно, что значения коэффициента отражения для двояковыпуклых находятся в диапазоне $R = 69,8...72\%$, плосковыпуклых – $R = 67,8...70,5\%$, двояковогнутых – $R = 71,9...74\%$.



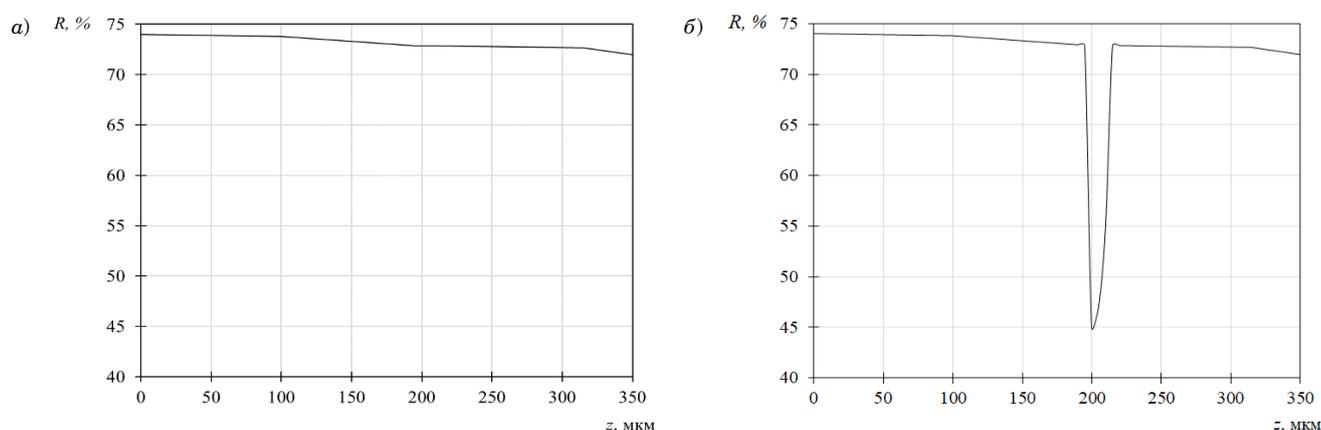
• Рис. 2. Распределение коэффициента отражения R по глубине двояковыпуклых микролинз: а – без свилей; б – при наличии свилей

• Fig. 2. Distribution of the reflection coefficient R over the depth of biconvex microlenses: а – without piles; б – in the presence of piles



• *Рис. 3. Распределение коэффициента отражения R по глубине плосковыпуклых микролинз: а – без свилей; б – при наличии свилей*

• *Fig. 3. The distribution of the reflection coefficient R over the depth of planar convex microlenses: а – without piles; б – in the presence of piles*



• *Рис. 4. Распределение коэффициента отражения R по глубине двояковогнутых микролинз: а – без свилей; б – при наличии свилей*

• *Fig. 4. Distribution of the reflection coefficient R over the depth of biconcave microlenses: а – without piles; б – in the presence of piles*

Наблюдаются провалы у кривых распределения на глубинах для двояковыпуклой $z = 250...265$ мкм, для плосковыпуклой – $z = 270...275$ мкм, для двояковогнутой – $z = 200...210$ мкм. Провалы связаны с поглощением светового излучения неоднородностями оптического материала. Измерения проводили на экспериментальной измерительной установке, точность измерений была не хуже $0,5\lambda$.

Заключение

В процессе эксперимента исследованы элементы микрооптики микроинтерференционным методом. Получены распределения коэффициента отражения по глубине и определена свиленость для элементов микрооптики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пурьев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
3. Тарасов К. И. Спектральные приборы. М.: Машиностроение, 1968. 389 с.
4. Исследование голографических материалов методом спектрального анализа / Е. Е. Майоров [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 519–524. Doi: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-519-524.
5. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Исследование оптических клиньев для оптических и оптико-электронных приборов и комплексов спектральным методом // Приборы. 2023. № 4 (274). С. 41–44.

6. Малакара Д. Оптический производственный контроль / пер. с англ. под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
7. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
8. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с.
9. Динамическая настройка экспериментальной интерференционной установки на базе интерферометра Жамена для контроля элементарных смещений поверхности объекта / Е. Е. Майоров [и др.] // Приборы. 2024. № 10. С. 17–22.

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. Fundamentals of optics. Moscow: Nauka; 1970. 855 p. (In Russ.).
2. Креопалова G. V., Lazareva N. L., Puryaev D. T. Optical measurements. Moscow: Mechanical engineering; 1987. 264 p. (In Russ.).
3. Tarasov K. I. Spectral devices. Moscow: Mechanical engineering; 1968. 389 p. (In Russ.).
4. Maiorov E. E., Kurlov V. V., Borodyansky Yu. M., Dagaev A.V., Tayurskaya I. S. Investigation of holographic materials by spectral analysis method. Journal of Instrument Engineering. Instrumentation. 2024;67(6):519–524. (In Russ.). Doi: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-519-524 (In Russ.).
5. Maiorov E. E., Kostin G. A., Chernyak T. A. Investigation of optical wedges for optical and optoelectronic devices and complexes by the spectral method. Instruments. 2023;4(274):41–44. (In Russ.).
6. Malakara D. Optical production control; trans. from English eds by A. N. Sosnova. Moscow: Mechanical engineering; 1985. 340 p. (In Russ.).
7. Afanasyev V. A. Optical measurements. Moscow: Nedra; 1968. 263 p. (In Russ.).
8. Akhmanov S. A., Dyakov Yu. E., Chirkin A. S. Introduction to statistical radiophysics and optics. Moscow; 1981. 640 p. (In Russ.).
9. Maiorov E. E., Borodyansky Yu. M., Guliyev R. B., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S. Dynamic tuning of an experimental interference installation based on the Jamen interferometer for monitoring elementary displacements of the object surface. Instruments. 2024;(10):17–22. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Майоров Евгений Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – физическая оптика, оптическое приборостроение.

Арефьев Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системный анализ и управление, математическое моделирование нелинейных процессов.

Гулиев Рамиз Балахан оглы, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системный анализ и управление, математическое моделирование нелинейных процессов.

Maiorov Evgeny E., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – physical optics, optical instrumentation.

Arefyev Alexander V., PhD in Phys. and Math. Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – system analysis and management, mathematical modeling of nonlinear processes.

Guliyev Ramiz B., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – system analysis and management, mathematical modeling of nonlinear processes.

Поступила в редакцию 16.12.2024

Поступила после рецензирования 19.12.2024

Принята к публикации 21.01.2025

Received 16.12.2024

Revised 19.12.2024

Accepted 21.01.2025

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Бобрышов А. П., Солёный С. В.,
Кузьменко В. П., Лач С. Ю., Демченко Г. В.**
Исследование воздействия внешних
условий на качество работы электричес-
ких контрольно-измерительных приборов..... 5
- Катышев А. Д.** Оценка факторов,
влияющих на качество производства
ампул реперных точек 16
- Винниченко А. В., Красовская Е. Д.**
Проектирование интегрированной
автоматизированной системы управления 22
- Шабалина А. Д., Чабаненко А. В.**
Исследование применения аддитивных
технологий в атомной энергетике 29
- Ситкина Е. К., Чабаненко А. В.** Цифровые
двойники: революционный подход
к управлению и оптимизации бизнес-
процессов 33

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

- Сергеев П. А., Солёный С. В., Бобрышов А. П.**
Роботизированный комплекс селективной
пайки выводных электронных компонентов
для предприятий электронной
промышленности..... 38
- Мишура Т. П.** Проектирование USB-
осциллографа и исследование его
метрологических характеристик..... 44
- Штыркин В. А.** Методы расчета эффек-
тивности экранирования радиоэлектронной
аппаратуры при эксплуатации
в полевых условиях 49

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Дьяченко А. А., Пинчук М. Э., Суров А. В.,
Никонов А. В., Серба Е. О., Наконечный Г. В.,
Попов С. Д.** Система временной синхро-
низации для изучения процессов в плазме
переменного тока промышленной частоты
методом оптической эмиссионной
спектроскопии..... 60

CONTENTS

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. PRODUCTION ORGANIZATION

- Bobryshov A. P., Solyonyj S. V., Kuzmenko V. P.,
Lach S. Yu., Demchenko G. V.** Investigation
of the impact of external conditions
on the quality of operation of electrical
test and measurement instruments 5
- Katyshev A. D.** Evaluation of factors
influencing production of fixed point cell's
production quality 16
- Vinnichenko A. V., Krasovskaya E. D.**
Designing an integrated automated control
system..... 22
- Shabalina A. D., Chabanenko A. V.**
Investigation of additive technologies
application in nuclear power engineering..... 29
- Sitkina E. K., Chabanenko A. V.** Digital twins:
a revolutionary approach to managing
and optimizing business processes 33

METHODS AND DEVICES OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

- Sergeev P. A., Solyonyj S. V., Bobryshov A. P.**
Robotic complex for selective soldering
of pin electronic components for electronic
industry enterprises..... 38
- Mishura T. P.** Designing a USB oscilloscope
and studying its metrological characteristics 44
- Shtyrkin V. A.** Methods for calculating
the effectiveness of REA shielding during
field operation 49

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Dyachenko A. A., Pinchuk M. E., Surov A. V.,
Nikonov A. V., Serba E. O., Nakonechny G. V.,
Popov S. D.** Time synchronization system for
studying processes in industrial frequency
alternating current plasma using optical
emission spectroscopy 60

Иванов М. Е., Решетников Д. В.
Нейросетевая коррекция навигационных систем высокоточных беспилотных летательных аппаратов на основе обучения нейросети без учителя..... 68

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ
И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Майоров Е. Е., Курлов В. В., Пушкина В. П.
Исследование экспериментальных образцов частично-когерентных источников излучения спектрофотометрической установкой 74

Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б.
Применение микроинтерференционного метода для реконструирования томографических данных по оптическим неоднородностям элементов микрооптики 79

Ivanov M. E., Reshetnikov D. V. Neural network correction of navigation systems of high-precision unmanned aerial vehicles based on neural network training without a teacher 68

**FUNDAMENTAL SCIENCES
AND APPLIED RESEARCH**

Maiorov E. E., Kurlov V. V., Pushkina V. P.
Investigation of experimental samples of partially coherent radiation sources by a spectrometric installation 74

Maiorov E. E., Arefyev A. V., Guliyev R. B.
Application of the microinterference method for reconstructing tomographic data on optical inhomogeneities of microoptic elements..... 79

Требования к порядку представления рукописей для публикации в научном журнале «Инновационное приборостроение»

1. Для публикации в журнале принимаются оригинальные научные материалы, не публиковавшиеся ранее и соответствующие тематической направленности журнала и критериям научного качества, представляющие интерес для научного сообщества. Авторы представляют в редакцию бумажную и электронную версии статьи в формате Microsoft Word (файл «Структура статьи и образец ее оформления» находится на сайте: <https://fs.guap.ru/inps/obr.pdf>). Заключение пишется в повествовательном стиле, не разбивается на пункты. Выводы должны быть лаконичными и точными, состоять из нескольких пронумерованных пунктов. Обычно количество пунктов соответствует количеству поставленных задач.

2. Объем статьи не должен быть менее 12 000 знаков с пробелами (7–8 машинописных страниц) и не должен превышать 40 000 знаков с пробелами (22–23 машинописные страницы).

Распечатка статьи должна быть подписана всеми авторами с указанием даты ее отправки.

3. К рукописи статьи должны прилагаться две рецензии (внутренняя и внешняя), заключения экспертной комиссии и комиссии экспортного контроля, отчет о проверке на наличие заимствований (процент оригинальности статьи должен составлять не менее 80).

4. При оформлении статьи необходимо придерживаться следующей структуры информации, представленной **на русском и английском языках**:

– фамилия, имя и отчество автора(-ов) полностью; ученая степень, ученое звание, почетное звание (если имеются); должность, название учреждения(-ий), в котором выполнена работа; город, где находится учреждение(-ия), страна. Если рукопись подается от нескольких учреждений, их следует пронумеровать надстрочно и так же пронумеровать авторов статьи. Необходимо указать телефоны, адреса электронной почты, ORCID авторов (при наличии); одного из авторов следует указать в качестве ответственного за переписку;

– индекс УДК. Помещают в начале статьи на отдельной строке слева;

– заглавие статьи;

– аннотация / Abstract. Объем ограничен 250 словами, использование ссылок и аббревиатур не допускается;

– ключевые слова / Keywords. У статьи может быть от 3 до 15 ключевых слов. Термины-словосочетания считаются одним ключевым словом.

5. В конце статьи размещается список источников / References на русском и английском языках. Список источников и ссылки на них оформляют по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографические записи в перечне нумеруют и располагают в порядке цитирования источников в тексте статьи. References оформляют согласно стилю Vancouver (файл «Основные правила оформления References в стиле Vancouver» расположен на сайте: <https://fs.guap.ru/inps/vancouver.pdf>).

Краткие технические требования к оформлению статьи

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и список источников) не должен превышать 22–23 страниц машинописного текста формата А4, набранных на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 14, поля не менее 2 см.

Простые **формулы** следует набирать в Word, сложные – с помощью редактора MathType или Equation. В десятичных дробях ставятся запятые. Для набора одной формулы не используйте два редактора одновременно. При наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой. Номер формулы (если он есть) набирается в тексте справа от формулы в скобках, не в формульном редакторе, не в таблице. Нумеруются те формулы, на которые в тексте имеются ссылки. При нумерации формул рекомендуется пользоваться десятичной системой.

При наборе формулы используйте только настройки по умолчанию; никогда не пользуйтесь вкладкой Size, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, введенные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = - ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в MathType полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» – «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что латинские набираются светлым курсивом, русские и греческие – светлым прямым, векторы и матрицы – прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации:

– рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, они должны быть выполнены в векторных программах: Visio (*.vsd, *.vsdx); Adobe Illustrator (*.ai); Coreldraw (*.cdr, версия не выше 15); Excel (*.xls); Word (*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF), веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF); Inkscape (экспорт в PDF);

– фотографии и скриншоты – в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Графические материалы (рисунки, схемы, иллюстрации) должны иметь последовательные порядковые номера, подписанные подписи на русском и английском языках (Рис. 1 / Fig. 1), обязательные ссылки в тексте. Условные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном тексте статьи или подрисуночной подписи.

Таблицы должны иметь последовательные порядковые номера, названия на русском и английском языках (Таблица 1 / Table 1), ссылки в тексте. Для всех показателей в таблице необходимо указать единицы измерений по СИ, ГОСТ 8.417-2002.

Полный перечень технических требований расположен на сайте: https://fs.guap.ru/inps/tech_tr.pdf.

**Рукописи, не соответствующие указанным требованиям,
не рассматриваются**

**Автор несет полную ответственность за точность и достоверность данных, приведенных в рукописи статьи,
присылаемой в редакцию журнала**